



Tiago Henrique Carvalho Simões

Licenciado

**Modelação automática 2D de
mineralizações filonianas – aplicação
às Minas da Panasqueira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida, Prof.
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria da Graça Azevedo de Brito
Arguente(s): Prof. Doutor Joaquim Eduardo Sousa Góis
Vogal(ais): Prof. Doutor José António de Almeida



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2014

MODELAÇÃO AUTOMÁTICA 2D DE MINERALIZAÇÕES FILONIANAS – APLICAÇÃO ÀS MINAS DA PANASQUEIRA

Copyright em nome de Tiago Henrique Carvalho Simões, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José António Almeida pela sua dedicação e paciência para comigo e sem quem não conseguiria atingir o objetivo traçado para este trabalho.

À minha filha Ísis, que me despertou, deu vontade de continuar e de nunca desistir.

À minha companheira, Susana agradeço-te a oportunidade que todos os dias me dás de ser feliz contigo.

Ao Diogo pela amizade de sempre e companhia.

À empresa Sojitz Beralt Tin & Wolfram pelos dados fornecidos que permitiram a realização deste trabalho.

À empresa Midland Valley por ter celebrado um protocolo de utilização de licenças educacionais do *software* Move® com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A todos os que me ouvem e aos que não, aos que se consideram meus amigos e aos que não, a ti Sol, a ti Lua e a ti meu amigo, obrigado!

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia protótipo destinada a efectuar a modelação automática a 2D da morfologia de mineralizações filonianas.

Em primeiro lugar procede-se à estimação do número de ocorrências de filões em cada bloco, de uma malha de blocos, em que se subdividiu o volume em estudo. Esta intensidade de ocorrências é quantificada por uma variável que representa o número de filões por metro linear (NFM) intersectados por uma sondagem vertical, e constitui o objectivo de intensidade a atingir. Seguidamente são gerados por simulação, linhas poligonais ou arcos correspondentes ao posicionamento dos filões no perfil. Estes arcos ligam alguns pares de intersecções de filões amostrados nas sondagens e são escolhidos ao acaso segundo regras de orientação e distância. Seguidamente faz-se a avaliação da intensidade local de filões do modelo e, para os locais onde exista défice de filões relativamente ao objectivo, são adicionadas intersecções virtuais, ou seja, que não foram reconhecidas por sondagens. Este procedimento continua até o modelo dos filões se aproximar do objectivo previamente definido.

O conjunto dos arcos em cada perfil, associado às espessuras de intersecção observadas nas sondagens, constitui um modelo morfológico dos filões em estrutura vectorial. No final faz-se a avaliação quantitativa do modelo e da incerteza.

Os dados do estudo prático que motivaram o desenvolvimento da metodologia foram recolhidos no depósito mineral das Minas da Panasqueira.

Os resultados obtidos no estudo mostram que a introdução de uma metodologia automática para a modelação vectorial de filões mineralizados é uma mais-valia, porque permite gerar modelos mais realistas e com melhor controlo geológico e resolução do que as abordagens clássicas de possança e acumulação, constituindo um auxiliar precioso de avaliação de reservas de minério.

Palavras-chave: Filões mineralizados; modelo morfológico; avaliação de reservas; estimação e simulação; incerteza morfológica.

ABSTRACT

This work presents a prototype methodology to automatically generate 2D morphological models of mineralized veins.

It begins by estimation of the number of occurrences of veins in each block of a grid partitioning the study volume. This vein intensity is quantified by a variable representing the number of intersections with veins of a vertical borehole and represents a local objective to achieve. Then, a set of arcs are generated by simulation corresponding to the location of the veins in the cross-sections. Each arc connects several veins intersections observed in the boreholes and are selected randomly according orientation and distance rules. Then, the intensity of veins of the model are evaluated and compared with the objective previously estimated, and for the blocks with veins deficit virtual intersections are added. This procedure continues until a tolerable difference is accepted.

The set of arcs within each cross-section plus the thickness of the intersections observed in the boreholes or simulated for the virtual ones constitutes the morphological model of the veins in a vector representation. At the end a volumetric evaluation and of the uncertainty can be performed.

Data from the mineral deposit of Panasqueira Mines motivated the development of the methodology and supports the case study.

The results show that the introduction of an automatic methodology for vector modelling of veins mineralization architecture has advantages because it allows generating more realistic models, with better geological control and resolution than the classical approaches of thickness and accumulation, constituting a valuable adjunct for evaluation of ore reserves.

Key-words: vein mineralizations; morphological model; reserves evaluation; estimation and simulation; morphological uncertainty.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Objetivos	1
1.2 Organização do Trabalho	3
2. MINERALIZAÇÕES FILONIANAS	5
2.1 Depósitos de Tungsténio	6
2.2 Minas da Panasqueira.....	9
2.2.1 Geologia	9
2.2.2 Morfologia dos filões	12
2.2.3 Mineralização	13
3. MÉTODOS.....	15
3.1 Estado da Arte	15
3.2 Metodologia	18
3.3 Estimação da Intensidade Local de Filões	20
3.3.1 Apresentação da variável número de filões por metro linear - NFM	20
3.3.2 Abordagem geostatística e krigagem com deriva externa	22
3.3.2.1 Introdução à geoestatística	22
3.3.2.2 Variografia e ajuste de modelos teóricos	23
3.3.2.3 Estimação por krigagem normal.....	24
3.3.2.4 Krigagem com deriva externa	25
3.4 Modelação da Geometria dos Filões por Objectos.....	26
3.5 Avaliação Quantitativa da Relação Volumétrica dos Filões com a Rocha Encaixante	33
4. CASO DE ESTUDO	35
4.1 Apresentação dos Dados e Malha de Blocos.....	35

4.2	Estimação da Variável NFM	37
4.3	Modelação Geométrica dos Filões	43
4.4	Quantificação de Resultados	48
4.5	Discussão.....	50
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Morfologia de filões (Fonte: Moon <i>et al</i> , 2006).	5
Figura 2.2 - Principais depósitos e relação com orogenias (Fonte: Lassner e Schubert, 1999). ...	7
Figura 2.3 - Distribuição mundial de depósitos de tungsténio (Fonte: Schmidt, 2012).	8
Figura 2.4 – Mapa geológico regional (Fonte: Jaques-Ribeiro et al, 2013).	10
Figura 2.5 - Corte geológico orientado SW-NE na localização das Minas da Panasqueira (Fonte: Lourenço, 2002).	10
Figura 2.6 - Cúpula granítica mostrando a coroa de sílica e veios mineralizados sub-horizontais (Fonte: Oosterom <i>et al</i> , 1984).	12
Figura 3.1 a) Sondagem vertical e intersecção com 3 filões sub-horizontais; b) cubo ou suporte de referência com a representação dos mesmos 3 filões sub-horizontais.....	17
Figura 3.2 Diferentes possanças aparentes do mesmo filão conforme é intersectado por uma sondagem.....	17
Figura 3.3 Duas fotografias de filões feitas em galerias na Mina da Panasqueira e respectiva interpretação geológica: a cinza a rocha encaixante, e a cores o filão com o quartzo a rosa e as pintas de volframite a beije.	19
Figura 3.4 Sequência das três etapas principais da metodologia proposta.	19
Figura 3.5 Procedimento de contabilização do número de intersecções de filões na localização das sondagens.....	21
Figura 3.6 Representação dos pontos de um variograma experimental para uma dada direcção em função da distância que separa os pares de amostras.	23
1) Figura 3.7 Representação das sondagens e intersecções com os filões num perfil e sobreposição com a malha de blocos. Os troços de sondagem a vermelho indicam o filão e os troços a azul a rocha encaixante.	27
Figura 3.8 Representação a tracejado das ligações possíveis entre sondagens limitadas ao ângulo máximo de inclinação que para efeitos ilustrativos se considerou 20°.	27
Figura 3.9 Representação a tracejado mais espesso da ligação seleccionada (4;6) e exclusão das ligações (4;7) e (6;5).	28

Figura 3.10 Evolução da simulação do filão, que neste momento fica com as ligações entre os nós (1;4;6).	29
Figura 3.11 Finalização do filão com as extensões inicial e final, que neste momento fica com as ligações entre os nós (8;1;4;6;9).....	29
Figura 3.12 Finalização da simulação dos filões que ficam com as três linhas poligonais (8;12;1;4;6;9), (12;2;3) e (10;3;5;7;11).	30
Figura 3.13 Geração de uma lei pseudo-cumulativa com a magnitude dos desvios (à direita), re-escalamento para o intervalo [0; 1] e simulação de Monte Carlo.	31
Figura 3.14 Representação dos desvios por iteração e identificação da iteração a que corresponde os menores desvios em valor absoluto neste caso seria a 6. Em cada iteração são adicionadas p intersecções virtuais.	32
Figura 3.15 Representação de duas realizações equiprováveis do campo de filões. Os traços a cor de laranja representam localizações potenciais de filões não amostrados pelas sondagens. O conjunto das intersecções (observadas ou virtuais) é processado do mesmo modo.....	32
Figura 3.16 Representação de duas realizações equiprováveis do campo de filões e respectivas possanças.....	34
Figura 4.1 Representação 3D das sondagens a azul, intersecções com filões a amarelo e a malha de blocos a cinza. A caixa mostra a envolvente da malha de blocos.	36
Figura 4.2 Representação dos valores médios de NFM por intervalos de cotas coincidentes com os intervalos da malha de blocos e em intervalos de 5m para confirmação da tendência. Para cotas próximas da superfície os valores são mais baixos, depois sobem em profundidade e finalmente voltam a diminuir.	38
Figura 4.3 Histograma global de NFM. Os valores seguem uma lei de distribuição muito assimétrica e com cerca de 20% de zeros (não intersecções).....	39
Figura 4.4 Variogramas experimentais da variável resíduos $R(x)$ para as direcções horizontal e vertical e respectivo modelo teórico isotrópico de tipo exponencial com 90 metros.....	40
Figura 4.5 Seis imagens 2D correspondentes aos valores estimados da variável NFM na malha de blocos do modelo e dados das sondagens utilizados na estimação. Os níveis de 1 a 5 são os mais representativos e o sexto têm muito menos sondagens.	41

Figura 4.6 Representação 3D da malha de blocos do modelo com os valores de NFM superiores a 0,2/m e as sondagens a azul com as intersecções dos filões a amarelo.	42
Figura 4.7 Representação das sondagens em planta juntamente com a área de influência dos 17 perfis em que se subdividiu a área de estudo.	43
Figura 4.8 Perfil 5: a) sondagens e intersecções com filões a vermelho; b) rede de ligações admissíveis entre intersecções; c) simulação de filões só com a informação das sondagens; d) simulação optimal dos filões após a adição de 150 intersecções virtuais; e) imagem estimada da NFM por krigagem com deriva externa (a escala é a mesma da figura 4.5). ..	44
Figura 4.9 Perfil 16: a) sondagens e intersecções com filões a vermelho; b) rede de ligações admissíveis entre intersecções; c) simulação de filões só com a informação das sondagens; d) simulação optimal dos filões após a adição de 50 intersecções virtuais; e) imagem estimada da NFM por krigagem com deriva externa (a escala é a mesma da figura 4.5). ..	45
Figura 4.10 Evolução da convergência da soma dos desvios para incrementos de 25 intersecções com filões por iteração para os perfis de 1 a 17.	46
Figura 4.11 Representação do conjunto das simulações 2D dos filões nos 17 perfis e vistas em secções verticais.	47

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Dimensão e teor médio de alguns exemplos de depósitos minerais de tungsténio. .	9
Tabela 2.2 – Principais minérios de tungsténio, fórmulas químicas e conteúdo em tungsténio.	13
Tabela 4.1 – Geometria da malha de blocos de baixa resolução.....	35
Tabela 4.2 – Síntese de resultados da intersecção das sondagens com a cota dos blocos da malha de baixa resolução.	37
Tabela 4.3 – Síntese de resultados da intersecção das sondagens com a cota dos blocos da malha de baixa resolução para os dados experimentais e para os valores estimados nos blocos...	42
Tabela 4.4 – Resultados de síntese dos modelos dos filões para os 17 perfis do volume em estudo.	46
Tabela 4.5 – Resultados quantitativos de uma realização de filões agregados por perfil.	48
Tabela 4.6 – Resultados das 20 realizações em termos de quantidades de síntese: comprimentos, possanças, volumes e REM.	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A morfologia e as características intrínsecas de um depósito mineral têm enorme importância na avaliação das reservas geológicas (reservas totais no volume em estudo) e das reservas mineiras (sub-conjunto das reservas geológicas onde é viável a exploração, depois de se associar um método de desmonte e um teor de corte – *cut-off grade*). Idealmente, a avaliação de reservas compreende o cálculo das tonelagens de minério, estéril e teores da variável de interesse (Almeida *et al*, 1997; Revuelta e Jimeno, 1997). Por exemplo, antes da fase de exploração é imprescindível possuir uma estimativa local, num suporte designado por bloco selecção, e uma estimativa global dos respectivos comportamentos da tonelagem e valor médio de uma ou mais características, às quais seja possível associar um benefício resultante da sua exploração (Charifo 2008; Charifo e Almeida, 2010).

A exploração de um depósito ou jazigo mineral é assim sempre precedida pela construção de um modelo geológico, a que se segue o modelo económico e o estudo das sequências de desmonte ou planeamento temporal da exploração. Por definição, um modelo geológico é mais do que uma simples representação dos dados disponíveis (*logs* de sondagens e as cartas e perfis geológicos), tem associada uma interpretação pericial e/ou estatística para além do que é amostrado ou observado num levantamento de campo. Esta cascata de modelos é implementada nas várias fases da exploração e é decisiva nas opções de início da exploração e posteriormente de avanço, pelo que más representações têm custos muito elevados. A interpretação dos resultados obtidos por estas ferramentas de modelação é fundamental na análise de risco económico face às opções de mineração, constituindo dados de entrada para a geração do chamado modelo económico do depósito mineral.

Um modelo geológico inclui dois sub-modelos, um da morfologia ou forma e outro das propriedades de interesse ou penalizantes (Almeida, 2010^a; Charifo *et al*, 2013). Os modelos morfológicos podem ser construídos de muitas formas e recorrendo a várias estruturas de dados como, por exemplo, desenho geológico vectorial, estimação ou simulação geoestatística da indicatriz, etc. (Almeida, 1992; Srivastava, 2005; Almeida, 2010^b; Nunes e Almeida, 2010; Quental *et al*, 2012). Estes modelos morfológicos são importantes e destinam-se a influenciar a estimação das propriedades, através de zonamentos regionais ou locais (Charifo *et al*, 2014). Os modelos das propriedades são sempre construídos no chamado modelo de blocos da mina e influenciam a decisão de desmonte e as sequências de exploração. Os modelos de depósitos minerais devem ser modulares no sentido de poderem ser continuamente actualizados à medida

que nova informação é obtida, assim como devem proporcionar poder fazer-se reconciliação com os teores à entrada na lavaria e analisar eventuais enviesamentos sistemáticos.

Nas mineralizações filonianas, os minérios de interesse económico ocorrem em filões que do ponto de vista morfológico são corpos geológicos, com áreas significativas e possanças centimétricas ou decimétricas, envolvidos por rocha encaixante.

Neste tipo de corpos geológicos, o principal problema de modelação é a sua dimensão e replicação em número, que não é compatível nem com uma digitalização (porque são muitos) nem com uma malha de blocos (porque são achatados). Modelar filões numa malha de blocos exigiria uma quantidade interminável de blocos não compatível com a computação actual, e mesmo que fosse possível, restaria ainda o problema de qual algoritmo utilizar, já que os algoritmos *pixel-based* da geoestatística são adversos a grandes diferenças de resolução horizontal e vertical nas malhas de blocos. Para obviar este problema, a abordagem clássica de modelação da morfologia destas mineralizações consiste na estimação de índices volumétricos suportados em malha de blocos, não sendo habitual modelação explícita das superfícies de tecto e muro dos filões.

A estimação de indicadores volumétricos recorrendo à estimação por krigagem com a informação das sondagens é viável, todavia a incorporação de informação geológica, por exemplo, a atitude e extensão dos filões é desprezada. Este esquecimento da informação geológica faz com que o modelo estimado seja totalmente dependente das estatísticas bi-ponto em função da distância pelo que um modelo deste tipo é incompleto e pode mostrar-se pouco realista. Pior do que isso, a falta de realismo esconde-se atrás de números numa malha de blocos sendo dificilmente detectada.

Da mesma forma que a construção de modelos geométricos das fracturas é importante para a extracção de propriedades como a porosidade e permeabilidade (Barbosa, 2013) ou índices de qualidade de rochas ornamentais (Luís e Sousa, 1998; Almeida *et al*, 2003), é importante que a primeira etapa da geração de um modelo deste tipo de depósitos seja a modelação explícita dos filões.

Uma pesquisa na literatura sobre a modelação explícita de filões em estrutura vectorial como uma etapa precedente da modelação deste tipo de depósitos mostrou que não existem trabalhos deste tipo, ou seja, se para fracturas existem muitos algoritmos de geração de planos por aproximações poligonais, para filões nada foi encontrado.

Está assim lançado o mote deste trabalho, desenvolver e testar um protótipo de geração da geometria de filões que constituirá a primeira etapa de um futuro fluxograma de modelação dos

depósitos filonianos. A abordagem proposta foi implementada a 2D. É uma modelação estocástica automática por objectos, onde os filões são representados por arcos ao longo de planos verticais com uma área lateral de influência.

O protótipo assenta num código informático que à data está escrito em linguagem Visual Basic 2010 e que futuramente deverá ser migrado para linguagem C. A estratégia de desenvolvimento teve em conta que toda a informação geológica pode ser apresentada sob a forma de histogramas ou leis estatísticas, onde se incluem a dimensão e a orientação. Estes aspectos poderão ser retrabalhados em futuras versões da aplicação adaptando-se a outros casos de estudo.

A informação de partida consiste em várias sondagens, onde estão registadas as metragens de início e fim das intersecções com os filões. Os dados são provenientes de sondagens da Mina da Panasqueira. A primeira visualização mostrou milhares de intersecções com filões, pelo que em termos de volume trata-se de um bom exemplo para testar a performance computacional da solução proposta. Todavia, a complexidade é limitada porque a maioria dos filões têm geometria sub-horizontal.

Para a visualização gráfica do modelo de blocos e da geometria dos filões foi utilizado o *software* Move® da empresa Midland Valley ao abrigo de um protocolo de utilização educacional com a FCT-UNL.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese encontra-se organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento geral do estudo, com os respectivos objectivos a atingir. No segundo capítulo faz um enquadramento mais concreto dos depósitos minerais filonianos, nomeadamente o das Minas da Panasqueira.

No capítulo três “Métodos” descrevem-se o estado da arte, metodologia e os algoritmos desenvolvidos e utilizados, quer para a simulação da geometria dos filões quer para a estimação geoestatística da intensidade local de filões com informação secundária.

No capítulo quatro faz-se a apresentação do caso de estudo, concretamente a descrição dos dados de partida, a estimação local da intensidade de ocorrência de filões, a modelação da geometria dos filões nos perfis seleccionados e a quantificação do volume de filões versus rocha encaixante.

No capítulo cinco apresentam-se as considerações finais e no seis as referências bibliográficas.

2. MINERALIZAÇÕES FILONIANAS

Do ponto de vista morfológico, uma mineralização considera-se filoniana quando apresenta forma tabular ou lenticular, ou seja, ocorre em corpos geológicos onde existe desproporção de dimensões entre o comprimento e a largura, por um lado, e também principalmente destes com a espessura. Nestes corpos, a região que os limita inferiormente designa-se de muro, já a que os limita superiormente designa-se por tecto (Misra, 2000; Robb, 2005; Moon *et al.*, 2006).

Os filões podem ter as mais variadas morfologias, sendo mais comuns as seguintes (figura 2.1):

- a) Filão bem definido;
- b) Filão com câmaras laterais;
- c) Filão em sela;
- d) Filões em escada.

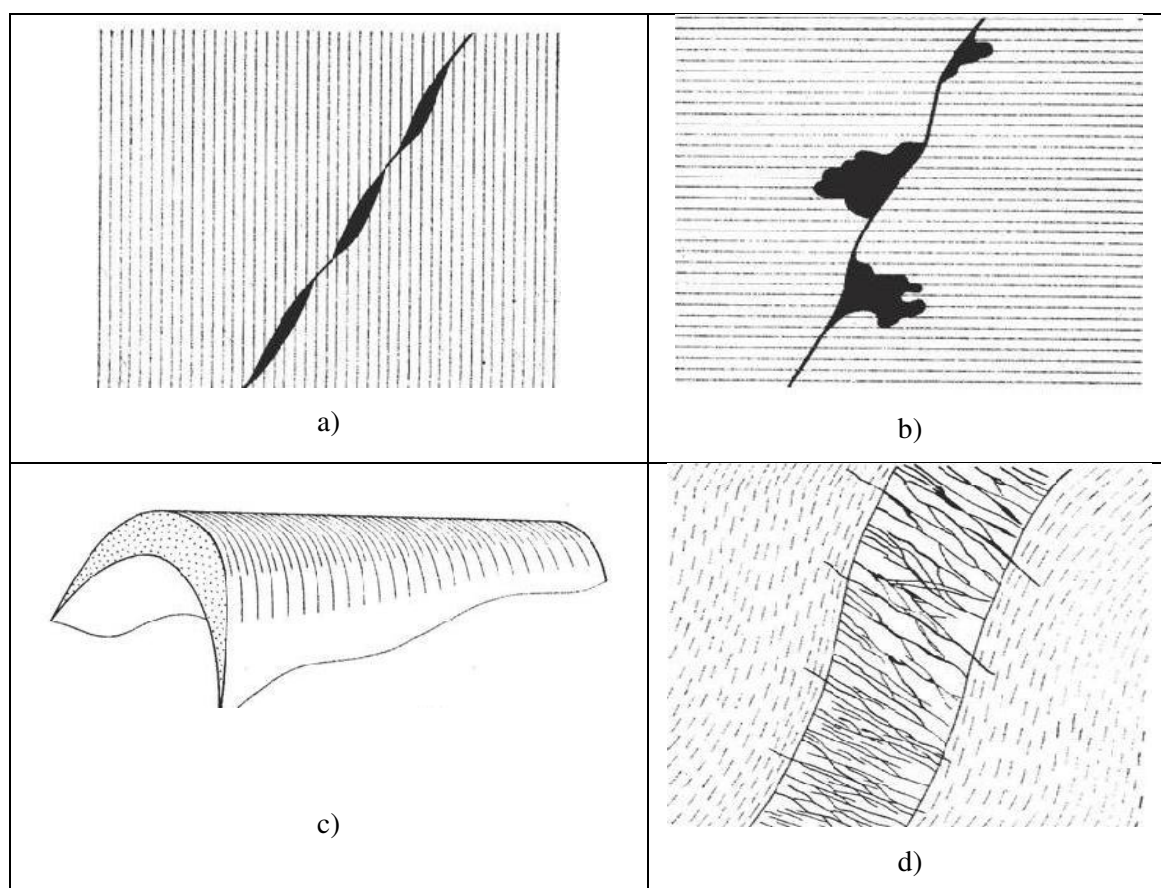


Figura 2.1 - Morfologia de filões (Fonte: Moon *et al.*, 2006).

Os filões podem ser classificados quanto ao pendor:

- Vertical e sub-vertical: pendores entre 75° e 90°;
- Inclinado: pendores entre 45° e 75°;
- Sub-inclinado: pendores entre 15° e 45°;
- Deitado ou sub-horizontal: pendores entre 0° e 15°.

E também conforme a sua relação com a rocha encaixante em:

- Discordante: quando os planos de estratificação são cortados;
- Filão-camada (concordante): quando o filão ocorre em concordância com as camadas de rochas pré-existentes;
- Camada: filão de grande extensão e tabular;
- Veio: filão de extensão e espessura reduzidas;
- Lenticular: filões confinados em xistos;
- Sistema filoniano: conjunto de filões que apresentam direções e pendores comuns;
- Stockwork: quando uma massa de rocha intensa e irregularmente fraturada acaba por ser mineralizada;
- Chaminé mineralizada: mineralização com pendor vertical ou próxima da vertical.

Os depósitos filonianos instalam-se em rochas pré-existentes, que são invadidas por fluidos mineralizantes, sendo assim designados por depósitos epigenéticos. Quanto à origem, as mineralizações filonianas resultam de processos magmáticos hidrotermais. Ocorrem quando uma solução aquosa passa pelas fracturas e nestas se vão precipitando ou difundindo. Nestes depósitos é muito habitual as mineralizações terem distribuição heterogénea, acumulando-se em regiões específicas do filão.

As mineralizações mais frequentemente associadas a estes processos são as de ouro, prata, molibdénio, urânio, ferro, estanho, zinco, chumbo, e tungsténio, este último o caso do depósito das Minas da Panasqueira.

2.1 DEPÓSITOS DE TUNGSTÉNIO

Todos os depósitos primários estão relacionados com metamorfismo de médio a alto grau e, principalmente, com fluidos hidrotermais associados a intrusões graníticas, localizando-se na periferia ou na vizinhança. Estes encontram-se localizados em zonas que sofreram orogenia.

Os depósitos de tungstênio podem ter várias idades, no entanto a maioria formou-se no Mesozoico. O maior número de ocorrências encontra-se no leste asiático, no entanto existem também depósitos importantes no Oeste do continente Norte Americano, Bolívia, Peru e na Península Ibérica (figura 2.2).

Os mais abundantes são os depósitos relacionados com as orogenias mesozoico-terciárias, onde 87% das reservas e 93% das reservas potenciais, localizam-se nestas áreas. Em segundo vêm os depósitos relacionados com as orogenias paleozoicas, que representam 10% das reservas e 6% das reservas potenciais. São raras as ocorrências do Pré-câmbrio, apenas 3% das reservas e 1% de reservas potenciais (Lassner et al, 1999).

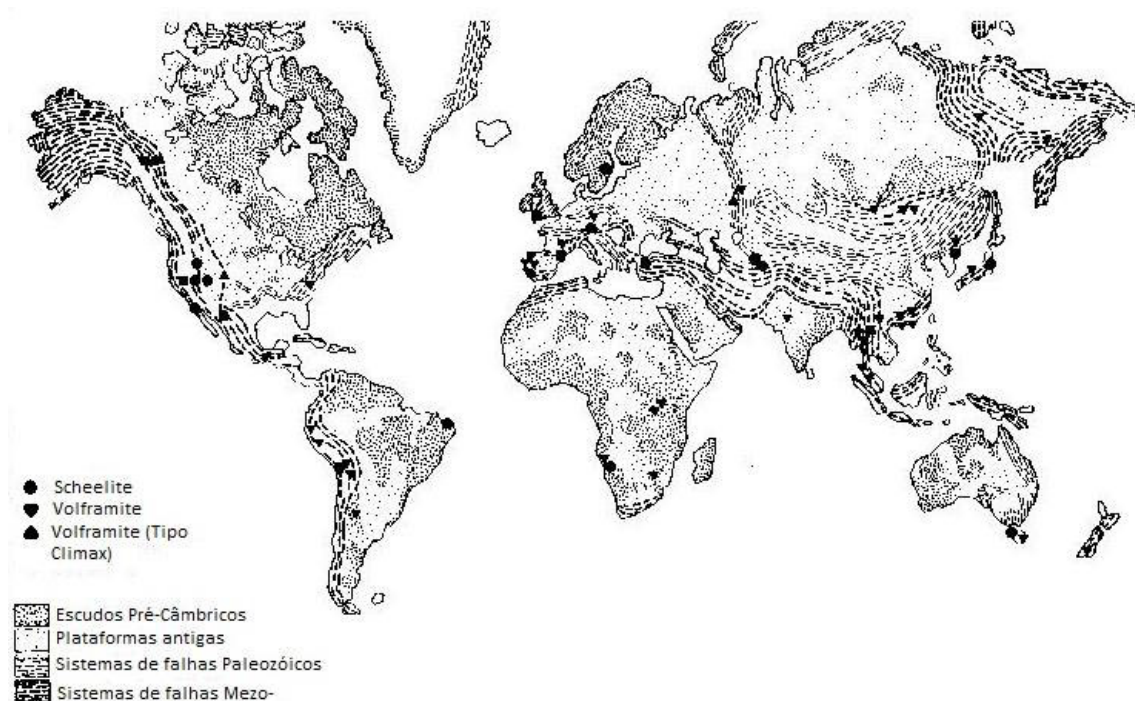


Figura 2.2 - Principais depósitos e relação com orogenias (Fonte: Lassner e Schubert, 1999).

Distinguem-se três grupos principais destes depósitos:

- Depósitos em veios – veios geralmente contínuos, com espessuras decimétricas a métricas, constituídos principalmente por quartzo. Verificam-se, principalmente, mineralizações de wolframite, mas também existem ocorrências de scheelite. Dentro dos depósitos em veios podem-se ainda distinguir-se três variedades de depósitos: (i) hidrotermais plutônicos; (ii) sub-vulcânicos; e (iii) pegmatítico-pneumatolíticos.

- Depósitos em skarn - substituição de carbonato por silicatos na proximidade de contactos com intrusões graníticas. Ocorrem mineralizações de scheelite ou polimetáticas (Pb, Zn, Cu), frequentemente acompanhadas de ouro, fluorite e magnetite.
- Depósitos mineráveis a granel (*Bulk mineable deposits*) – greisen, pórfiros, stockwork. Termo utilizado quando se podem explorar grandes volumes de material de baixo teor. Os greisen e os pórfiros podem ser encontrados na zona apical de intrusões félsicas, já os stockworks podem ser localizados tanto nas intrusões como na zona envolvente. Ocorrem associados a mineralizações de scheelite e volframite, por vezes simultaneamente, trazendo dificuldades na concentração mineralúrgica.

Na tabela 2.1 listam-se o tamanho e o teor de alguns depósitos de tungsténio a nível mundial e na figura 2.3 a localização geográfica desses depósitos a nível mundial.

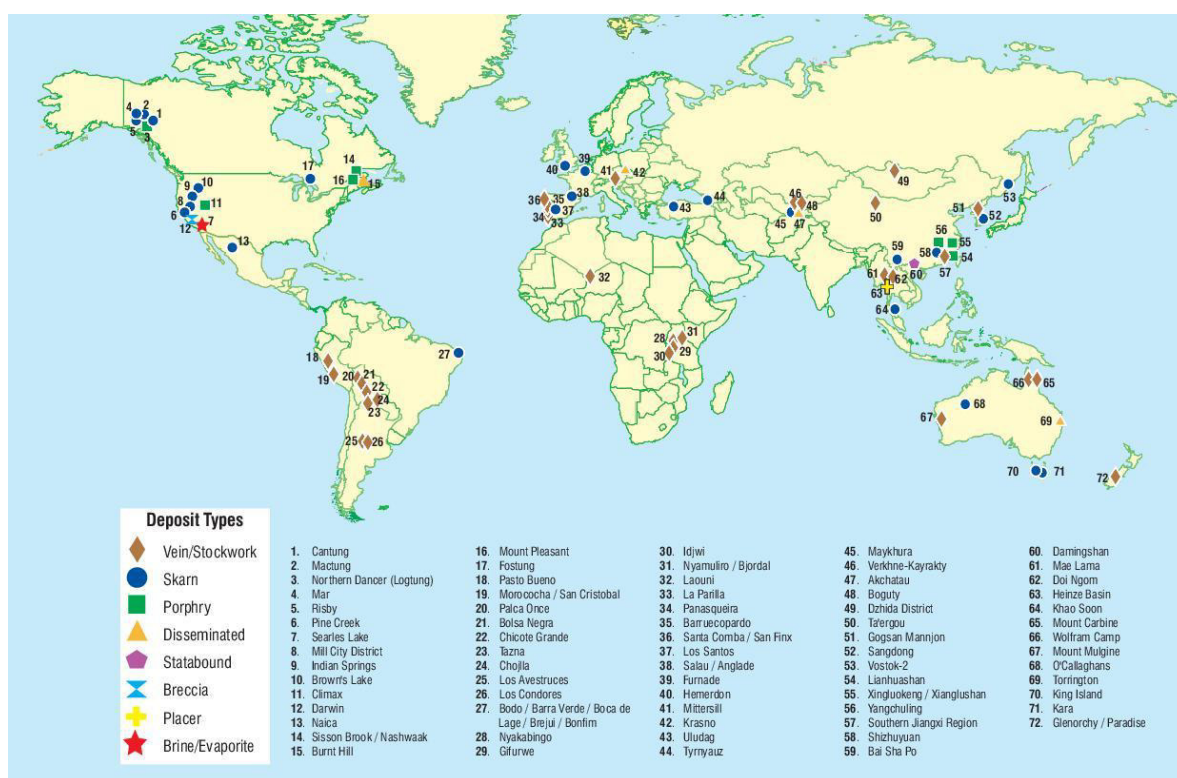


Figura 2.3 - Distribuição mundial de depósitos de tungsténio (Fonte: Schmidt, 2012).

Tabela 2.1 – Dimensão e teor médio de alguns exemplos de depósitos minerais de tungsténio.

Tipo de depósito	Ordem de grandeza das reservas (tons métricas)	Teor de referência em WO ₃ (%)	Representatividade (% do total)	Exemplos a nível mundial
Skarn	10 ⁴ – 5x10 ⁷	0,3 - 1,4	41	Vostok-2 (Rússia), Uludang (Turquia)
Veios, brechas e stockwork	10 ⁵ – 10 ⁸	0,5 - 5,0	35	Panasqueira (Portugal), Xihuashan (China), Bolsa Negra (Bolívia)
Pórfiros	10 ⁷ – 10 ⁸	0,1 - 0,4	16	Jiangxi (China), Climax (USA)
Disseminado	10 ⁷ – 10 ⁸	0,1 - 0,5	5	Shizhuyuan (China), Akchatau (CIS)
Stratabound	10 ⁶ – 10 ⁷	0,2 - 1,0	3	Mittersill (Áustria), Damingshan (China)

2.2 MINAS DA PANASQUEIRA

O depósito mineral explorado nas Minas da Panasqueira é constituído por um complexo e extenso campo filoniano quartzoso sub-horizontal. Tem como mineral principal a volframite e, do ponto de vista económico, para além do tungsténio, podem ser encontrados minérios de cobre, estanho, e outros metais.

2.2.1 GEOLOGIA

O couro mineiro da Panasqueira localiza-se no complexo xisto-gresoso das Beiras, fazendo parte do Maciço Central, pertencente à Zona Centro Ibérica (figura 2.4 e 2.5).

Para além de xistos argilo-gresosos, na área encontram-se quartzitos xistoides com xistosidade vertical. Identificam-se duas zonas distintas, uma de xistos-argilosos e outra de xistos-argilosos mosqueados, estes últimos associados a maior probabilidade de mineralização.

Os primeiros estudos completos sobre a geologia da Panasqueira foram realizados por Décio Thadeu em 1951 (Thadeu, 1951), que indicou aflorarem principalmente formações metassedimentares de xistos argilo-gresosos, que passam frequentemente a quartzitos xistoides de forma lenticular. Estas formações fazem parte dos xistos das Beiras, o que indicia que datam do Pré-câmbrico superior (Sousa, 1985; Jaques-Ribeiro, 2013).

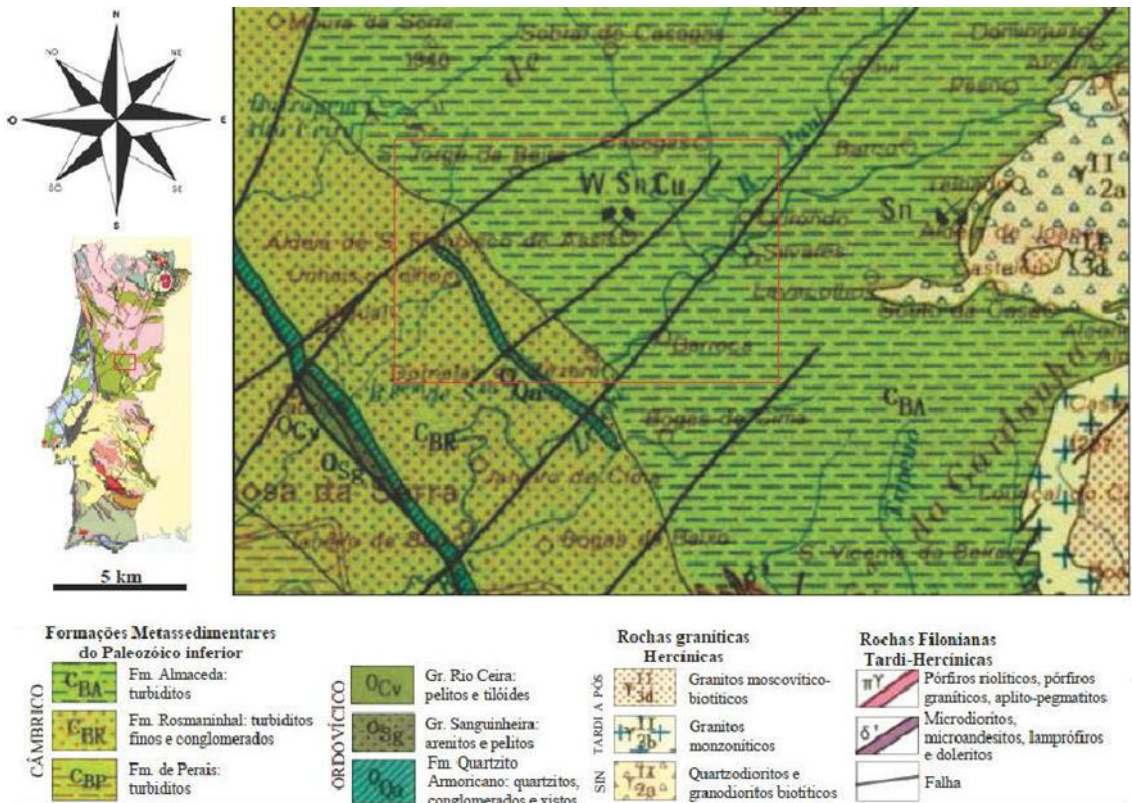


Figura 2.4 – Mapa geológico regional (Fonte: Jaques-Ribeiro et al, 2013).

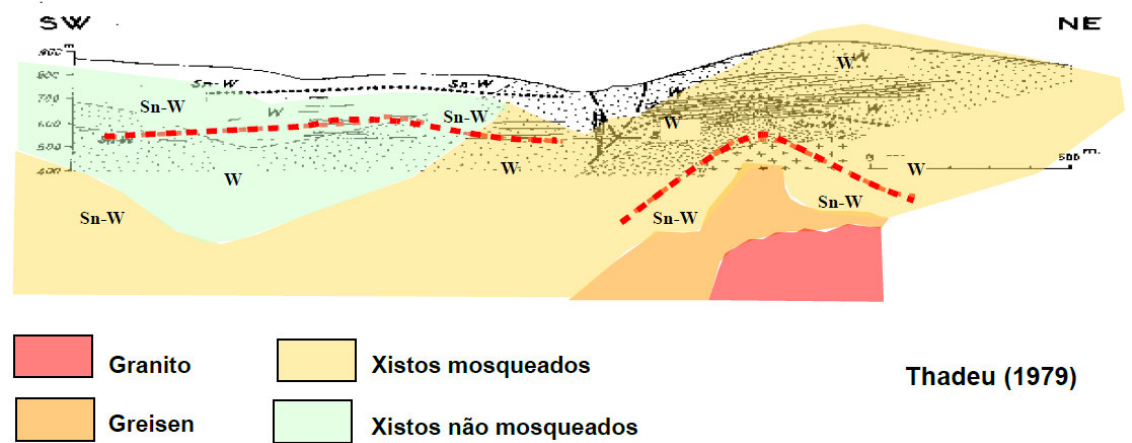


Figura 2.5 - Corte geológico orientado SW-NE na localização das Minas da Panasqueira (Fonte: Lourenço, 2002).

Devido a fenómenos de magmatismo encontram-se filões de greisen e aplitos, diques doleríticos sub-verticais e ainda filões de quartzo sub-horizontais.

É encontrada uma intrusão granítica cuja parte superior se encontra bastante greizenizada, onde ocorrem lenticulas de quartzo.

Segundo Thadeu (1951), a paragénese da rocha granítica segue a seguinte sequência:

- Fase magmática: zircão, apatite, monazite, ilmenite, moscovite, quartzo, moscovite, biotite e plagioclase;
- Fase de transição e endoblástica: feldspato potássico, moscovite e quartzo;
- Fase hidrotermal: apatite, berilo, turmalina, fluorite, cassiterite, volframite, arsenopirite, calcopirite e blenda.

As séries metassedimentares apresentam metamorfismo de baixo grau, e em alguns sectores verifica-se a existência de metamorfismo de elevado grau, com desenvolvimento de corneanas, sendo este controlado pela natureza e pela fracturação da rocha encaixante.

Segundo Thadeu (1951), existem três sistemas de falhas principais, todas antecedidas pela mineralização de W-Sn-Cu, contemporâneas dos deslocamentos tardi-hercínicos e precedidas pela Orogenia Alpina que as reativou:

- Sistema NE-SW: Falha da Cebola;
- Sistema N-S: Falha principal, Falha Poente e Falha do Vale das Freitas;
- Sistema ENE-WSW.

São ainda identificados sistemas de diáclases sub-horizontais, onde se instalaram filões mineralizados (Sn-W-Cu).

Marignac (1973) defende que as diáclases foram originadas por rotura frágil, associadas à instalação da cúpula granítica. Já Ribeiro e Pereira (1981) propõem que a abertura das diáclases resulte da abertura de fendas de tracção normais ao estiramento da primeira fase de deformação hercínica.

Lourenço (2002) refere que o diaclasamento é na maioria posterior ao metamorfismo de contato, devido à ausência de metamorfismo de contato nas zonas das diáclases.

A região foi afetada por três orogenias: caledónica, hercínica e alpina. Os indícios da primeira encontram-se mascarados, já os da segunda são os responsáveis, segundo Thadeu (1951) das xistosidades, assim como das diáclases principais, esta está relacionada também com as mineralizações de volframite. A orogenia alpina foi responsável pelas falhas com direcções predominantes ENE-WSW e N-S.

Uma complexa série de sedimentos pelíticos e semi-pelíticos deformados sofreram metamorfização durante o estágio inicial de compressão ocorrido durante a orogenia hercínica.

A zona mineralizada intersecta a cúpula granítica greisenizada. No topo da intrusão regista-se uma massa quartzítica lenticular, chamada de coroa de sílica ou “sílica cap” (figura 2.6).

A vizinhança do depósito está extremamente metamorfizada identificando-se corneanas. O depósito não se encontra significativamente afetado pelas deformações e metamorfismo pós-pérmicos.

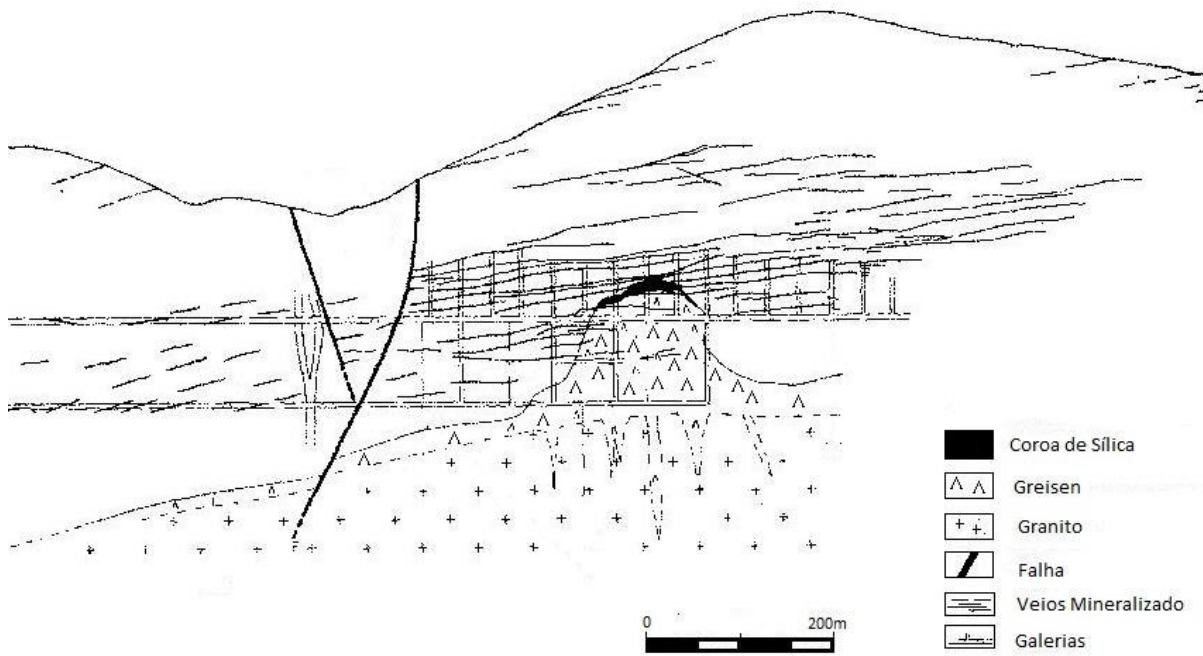


Figura 2.6 - Cúpula granítica mostrando a coroa de sílica e veios mineralizados sub-horizontais (Fonte: Oosterom *et al*, 1984).

2.2.2 MORFOLOGIA DOS FILÕES

Regra geral, a mineralização ocorre em filões de quartzo sub-horizontais e mais raramente subverticais. Alguns trabalhos referem a identificação de mais de 1000 filões (Póvoa, 2011).

Segundo Lourenço (2002), os filões predominam em três direções. A primeira NW-SE, com pendores médios de 10° para SW, a segunda SW-NE com dois tramos de pendores opostos, um 6-10° para NW e outro 20 a 30° para SE e uma terceira mais rara SW-NE com pendores que vão dos 30 a 50° SE (filões galo).

Os filões sub-horizontais encontram-se instalados em diaclases pré-existent e, apesar da complexidade da sua morfologia, podem-se caracterizar como lentículas de quartzo com espessura média de 30 a 40 cm e extensão que pode chegar aos 200 m. Estes filões terminam com estreitamentos muito rápidos e geometria sigmóidal o chamado “rabo de enguia” (Reis, 1971; Silveira, 2008). Ocorrem ainda diques, praticamente verticais, e com espessuras que podem ir dos 0,5 metros aos 3 metros.

Os filões explorados na mina constituem uma complexa rede de lentículas mineralizadas paralelas entre si e conectadas através de “filões galo” e “rabos de enguia”. A distância entre estas é variável e verifica-se frequentemente o salto de uma lentícula para outra em “rabo de enguia”. A forma das lentículas costuma ser irregular devido às frequentes subdivisões.

2.2.3 MINERALIZAÇÃO

Os filões do depósito da Panasqueira são constituídos essencialmente por quartzo (mais de 90%), sendo o restante composto por minérios e ganga (minerais sem valor económico que ocorrem no filão). Os principais minerais de tungsténio são a ferberite, a volframite, a scheelite, a stolzite e a hubnerite (tabela 2.2), no entanto é comum referir-se a volframite como todos os minerais entre a ferberite e a hubnerite (Pitfield, 2011).

Tabela 2.2 – Principais minérios de tungsténio, fórmulas químicas e conteúdo em tungsténio.

Mineral	Fórmula química	Conteúdo em tungsténio, teor de WO ₃ (%)
Ferberite	FeWO ₄	76,3
Volframite	(Fe, Mn)WO ₄	76,5
Hubnerite	MnWO ₄	76,6
Scheelite	CaWO ₄	80,6
Stolzite	PbWO ₄	50,9

Dos minerais referidos destaca-se a scheelite como a mais abundante e presente em cerca de dois terços dos depósitos de tungsténio conhecidos a nível mundial.

Nas minas encontram-se duas mineralizações importantes, a principal em Sn-W-Cu e uma secundária de Sn-Cu. A mineralização de Sn-W-Cu encontra-se em filões de quartzo sub-horizontais e muito raramente em filões sub-verticais (filões galo), com um pendor de 10 a 70° para SE e uma orientação NE-SW. A mineralização de Sn-Cu sobrepõe-se à de Sn-W-Cu e pode ocorrer, quer disseminada no encaixante metassedimentar ou em zonas fracturadas dos filões de quartzo, quer em filões de quartzo sub-horizontais.

Devido a vários factores, a mineralogia e a sucessão mineral é de difícil compreensão, no entanto, segundo Lourenço (2002), pode-se inferir o seguinte, quanto ao preenchimento dos filões:

1. Associadas a quartzo leitoso, ocorrem moscovite, volframite, cassiterite e arsenopirite, posicionadas preferencialmente nas zonas dos encostos dos filões. Os cristais crescem essencialmente em massas, com exceção da cassiterite que é sempre euédrica.
2. Na zona central ocorrem sulfuretos como a calcopirite, arsenopirite, pirite e blenda associados a quartzo mais hialino, com frequentes geodes que indiciam crescimento em espaço aberto.
3. Abundante marcassite, principalmente em pseudomorfoses ou recobrando a arsenopirite ou a siderite, quer em cristais euédricos, por vezes de grandes dimensões, quer em massa a preencher fraturas;
4. Por fim, a cobrir todos os outros minerais, ocorrem carbonatos.

Thadeu (1951) considera a existência de três estádios para a mineralização de Sn-W-Cu, o primeiro constituído por cassiterite, volframite, moscovite, apatite, arsenopirite, quartzo e turmalina, o segundo de deposição de sulfuretos e o último em que predominam os carbonatos.

Já Kelly e Rye (1979) consideram a existência de quatro estádios principais:

- Estádio dos óxido-silicatos (EOS): consiste em dois sub-estádios, um inicial constituído pela salbanda de moscovite associada a turmalina, topázio, arsenopirite e cassiterite e um posterior constituído por volframite, quartzo, moscovite e arsenopirite;
- Estádio principal dos sulfuretos (EPS): constituído principalmente por arsenopirite, pirite, pirrotite, calcopirite, blenda, apatite e quartzo;
- Estádio da alteração da pirrotite (EAP): Caracterizado pela alteração da pirrotite em pirite e marcassite e pela presença de grandes quantidades de siderite;
- Estádio dos carbonatos tardios (ECT): Constituído por dolomite e calcite e ainda sulfuretos como a pirite, a blenda e a calcopirite.

Apesar da textura dos filões ser bastante irregular, a distribuição dos minerais é a seguinte: a cassiterite, a turmalina e a moscovite em geral crustificam os encostos, já a volframite e os sulfuretos tem tendência a depositar-se junto ao muro e ao tecto.

A ocorrência de grandes cristais indicam que a mineralização terá ocorrido por preenchimento de espaços abertos. Segundo Kelly e Rye (1979) estes espaços terão resultado da dilatação devido à pressão hidráulica exercida pelos primeiros fluidos.

O tungstato presente nas estruturas mineralizadas da Panasqueira aproxima-se do termo final ferberite (FeWO_4), apresentando concentrações médias em MnWO_4 (Thadeu, 1951).

A exploração mineira aproveita e concentra em lavaria a volframite, a cassiterite e as pirites cupríferas.

3. MÉTODOS

3.1 ESTADO DA ARTE

Um modelo geológico de um depósito mineral é uma representação em computador da morfologia e dos teores dos elementos químicos ou propriedades de interesse. Um modelo morfológico mostra um ou vários cenários equiprováveis da forma do corpo geológico; já um modelo de propriedades mostra os valores de uma característica quantitativa que valoriza ou penaliza a mineração (teor, densidade) ou qualitativa no espaço tridimensional. Os dois estão interligados, mas primeiro constrói-se o modelo da morfologia e depois o das propriedades. Se a morfologia discriminar as propriedades, o que acontece quase sempre, então os modelos das propriedades devem ser condicionados à morfologia e para isso devem ser utilizados fluxogramas com os algoritmos mais adequados que possam integrar a informação disponível de forma faseada (Matias *et al*, 2010^{ab}). A incorporação sucessiva da informação disponível utiliza primeiro os dados indiretos da morfologia (geologia, geofísica) e no final os dados diretos das propriedades (sondagens).

Existem atualmente muitos algoritmos disponíveis para construir modelos, com vários pedigrees, mas um bom modelo começa por não ser mau, deve ser simples, e tem de dar respostas para os objetivos a que se destina. Um bom modelo tem de ser construído com dados bons (fiáveis). Os algoritmos de simulação são úteis porque a incerteza do resultado é quantificada pela dispersão das soluções obtidas (Soares, 2000; Alves *et al*, 2014).

O modelo da morfologia do depósito, nomeadamente, os algoritmos envolvidos, se intervêm conhecimento pericial, e a estrutura de representação vetorial ou matricial (geocelular), depende, entre outros fatores, da forma e do tipo de depósito, da quantidade e variedade de informação disponível e também do grau de discriminação entre a morfologia e as propriedades.

De uma forma simplificada, e quanto à forma, os depósitos minerais podem ser de tipo tabular, maciço, filões e fissural. Para gerar um modelo morfológico de um depósito de tipo tabular, é suficiente fazer a estimação de duas superfícies, respetivamente do teto e do muro, a partir da informação retirada de um conjunto de sondagens que intersectam o depósito. Uma morfologia definida por duas superfícies de teto e muro não envolve completamente o depósito mas está implícito que as duas superfícies se ligam por pontos de controlo homólogos, normalmente os cantos das superfícies. Para a sua geração podem ser utilizados interpoladores como triangulação, splines, inverso do quadrado das distâncias ou krigagem. Se o depósito mineral for uma massa irregular 3D, é necessário modelar a geometria por um mosaico de superfícies que envolva completamente o depósito. Existem programas informáticos que geram automática ou

semi-automaticamente estas superfícies 3D fechadas a partir da informação das sondagens. Outra abordagem alternativa é digitalizar manualmente contornos dos limites do depósito em perfis ou secções e depois interpolar o mosaico das superfícies entre perfis (Almeida, 1992; Caupers *et al*, 1995; Rodrigues, 2013). A digitalização tem vantagens porque permite incluir informação pericial que não seria possível incluir numa construção completamente automática (Almeida, 1992; Almeida *et al*, 1993). Os depósitos de tipo fissural são os que contêm a morfologia mais complexa porque a mineralização ocupa descontinuidades na rocha encaixante, pelo que a modelação destes depósitos é normalmente feita pela delimitação da envolvente regional do depósito e pela estimação de uma variável de controlo morfológico como, por exemplo, a densidade, ou então diretamente pela estimação dos teores que actuam simultaneamente como propriedade e variável de controlo morfológico. A interpolação de superfícies gera modelos de topologia vetorial, e têm simplificações importantes. Por exemplo, se uma sondagem incluir várias intersecções muito próximas, a digitalização pode ser simplificada pelo desenho do pacote das intersecções, e também com a junção de vários tipos de minério no mesmo corpo. Quando a simplificação é demasiada, é comum a geração de um segundo modelo morfológico, em estrutura matricial agora de alta resolução. Estes modelos de alta resolução são construídos com algoritmos geoestatísticos de estimação ou simulação e recorrem ao formalismo da indicatriz (Goovaerts, 1997; Soares, 2000; Quental *et al*, 2012).

A modelação morfológica de depósitos minerais onde as mineralizações ocorrem em filões, como as da Mina da Panasqueira que motivou este estudo, é recorrentemente feita por modelos matriciais de atributos numéricos implícitos como a possança e os índices de fracção de volume. Tratam-se de modelos que não materializam a forma dos filões ou lentículas mineralizadas por objetos ou superfícies mas recorrem a um atributo numérico que expressa a morfologia de forma quantitativa. Para a sua implementação é necessário dispor de um conjunto alargado de sondagens e assumir que as sondagens intersectam os filões sempre na perpendicular (figura 3.1).

Procede-se então do seguinte modo: (a) em todas as sondagens identificar o teto e o muro dos filões; (b) regularizar as sondagens para um determinado comprimento previamente estabelecido (suporte) e contabilizar a respetiva possança nesses suportes ou a relação entre a soma dos comprimentos dos filões e o comprimento do suporte – esta variável relação passa a ser considerada a variável regionalizada de estudo; (c) utilizar uma malha 3D de blocos que envolva todo o depósito e estimar a fração do volume de filões no bloco (suporte de desmonte mineiro).

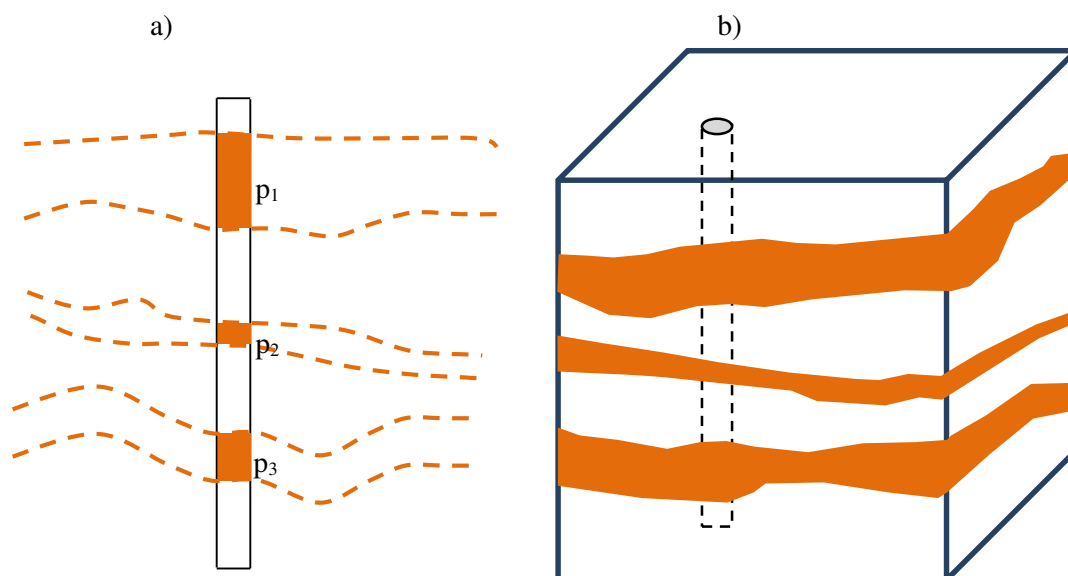


Figura 3.1 a) Sondagem vertical e intersecção com 3 filões sub-horizontais; b) cubo ou suporte de referência com a representação dos mesmos 3 filões sub-horizontais.

Esta metodologia clássica tem a principal vantagem de ser simples por não recorrer à geração da geometria dos filões por superfícies envolventes. Os valores apresentados são tanto mais realistas quanto mais as intersecções entre as sondagens e os filões ocorrerem na perpendicular (figura 3.2). Os resultados estimados da variável fração de volume podem ser utilizados como um primeiro teor de corte morfológico. Todavia apresentam desvantagens, dos quais a principal é não existir controlo geológico na estimação da morfologia. Também a avaliação tem em conta as possanças identificadas nas sondagens, que são aparentes e não as reais, pelo que os valores registados nas sondagens são sempre superiores aos reais o que gera uma sobreestimação sistemática dos volumes dos filões.



Figura 3.2 Diferentes possanças aparentes do mesmo filão conforme é intersectado por uma sondagem.

Para a geração de um modelo morfológico vetorial da envolvente dos filões uma hipótese seria digitalizar exhaustivamente os contornos dos filões em perfis a que se seguiria a geração de

ligações entre perfis adjacentes. Todavia, o conjunto de dados das Minas da Panasqueira, que inspirou e motivou este estudo, mostrou que tal tarefa é impossível pelo elevado número de filões que são cruzados pelas sondagens e pela impossibilidade de os relacionar entre sondagens do mesmo perfil mesmo que muito próximas. Outra questão importante é as sondagens não estarem igualmente distribuídas pela área de estudo, pelo que uma eventual digitalização sistemática seria tendenciosa porque nem todos os filões estão efetivamente reconhecidos pelas sondagens.

Neste estudo apresenta-se uma abordagem protótipo inovadora para a modelação morfológica de depósitos minerais onde as mineralizações ocorrem em filões, que consiste na geração automática do esqueleto dos filões (arco correspondente ao eixo do filão num plano vertical) sendo posteriormente avaliadas a fracção do volume de filões por bloco de desmonte. A metodologia propõe que as ligações das intersecções dos filões entre sondagens seja feita de forma automática recorrendo a uma abordagem de simulação estocástica que se descreve seguidamente.

3.2 METODOLOGIA

A informação de partida para a construção do modelo morfológico são um conjunto de sondagens com indicação das coordenadas iniciais e finais da sondagem e coordenadas iniciais e finais de cada intersecção do filão. As sondagens tem informação da presença dos filões e da sua ausência. São todas verticais, ascendentes ou descendentes, e vistas em planta estão organizadas por perfis pelo menos nalgumas zonas.

Quanto aos filões, sabe-se do ponto de vista morfológico têm maioritariamente orientação sub-horizontal e possanças muito variadas, desde poucos centímetros até mais de um metro. Como as sondagens são todas verticais, neste trabalho de modelação não foram consideradas estruturas potencialmente mineralizadas com orientação vertical. Os filões são quartzosos e contém minerais metálicos associados, tais como, volframite e pirite cuprífera. Refira-se que o âmbito deste estudo foi restrito à modelação dos filões de quartzo, todavia a presença dos minerais metálicos é condicionada à presença destes filões pelo que a sua modelação constitui uma etapa muito importante na avaliação de reservas.

A figura 3.3 mostra duas fotografias feitas a partir de uma galeria da mina onde se observam filões. Nestas imagens percebe-se a problemática e complexidade do problema de modelação da morfologia, porque se por um lado os filões são sub-horizontais a forma como terminam é muito abrupta.

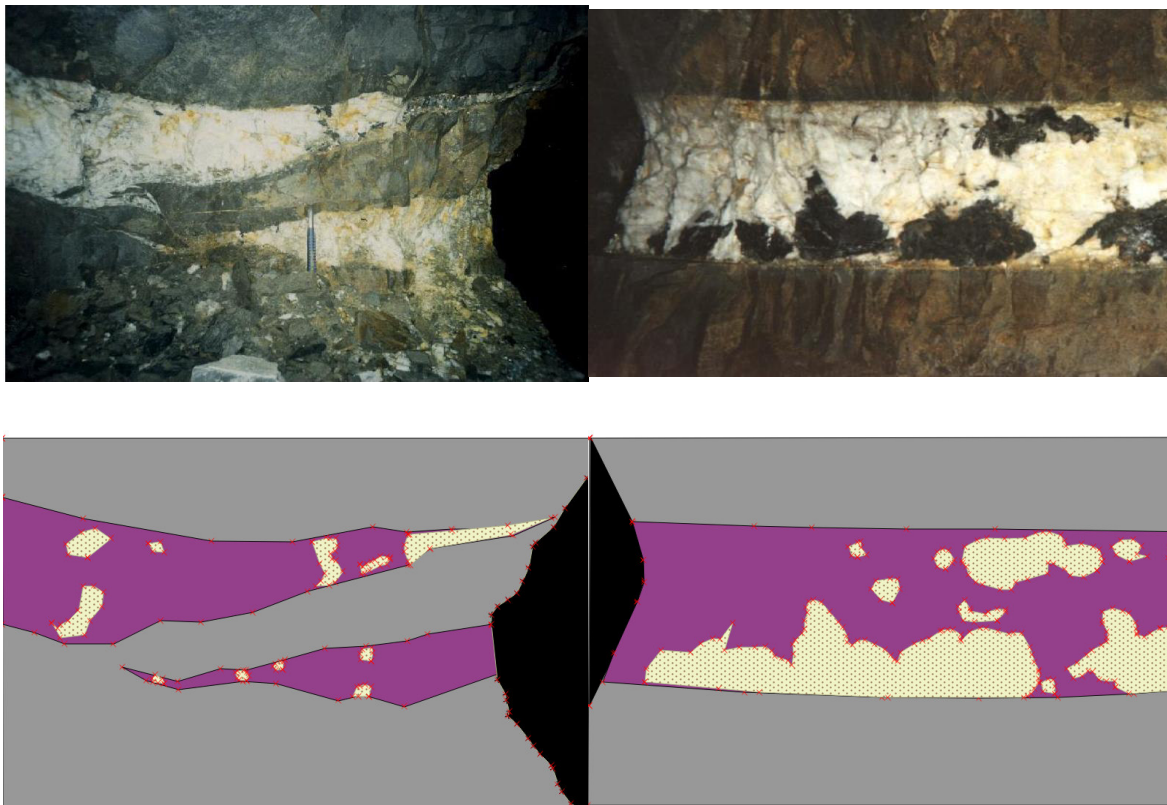


Figura 3.3 Duas fotografias de filões feitas em galerias na Mina da Panasqueira e respectiva interpretação geológica: a cinza a rocha encaixante, e a cores o filão com o quartzo a rosa e as pintas de volframite a beije.

Para a modelação da morfologia de filões num depósito mineral como o que é observado nas Minas da Panasqueira, de que as duas imagens apresentadas são um bom exemplo, propõe-se uma metodologia e respetiva avaliação quantitativa que se descreve seguidamente, primeiro pelas principais etapas e respectiva articulação e depois mais em detalhe etapa a etapa. Contempla três etapas principais (figura 3.4).

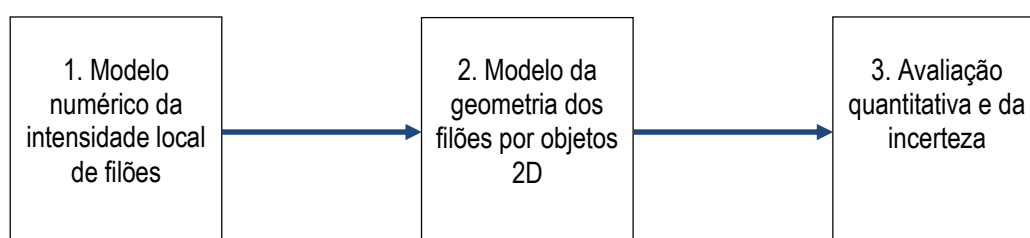


Figura 3.4 Sequência das três etapas principais da metodologia proposta.

Na primeira etapa instala-se uma malha de blocos 3D, de espaçamento largo, e faz-se a estimação da variável regionalizada “número de filões por metro linear” (NFM), ou seja, o número médio de intersecções de filões com linha de amostragem vertical que é a sondagem. Esta variável de controlo morfológico regional e local é muito importante, porque os depósitos minerais filonianos têm zonas com muito maior quantidade de filões do que outras e porque o reconhecimento por sondagens não é regular e existem zonas mais amostradas do que outras. Para a estimação desta variável, e porque tem um comportamento não estacionário da média em profundidade, utilizou-se a krigagem com deriva externa.

Na segunda etapa faz-se o modelo da geometria dos filões a 2D por objetos. Nesta etapa são trabalhadas fatias verticais a 2D, onde se simulam cenários possíveis da geometria dos filões e respectivas ligações entre sondagens, condicionando aos dados das sondagens quer a presença quer a ausência dos filões. Esta etapa é condicionada pelo modelo numérico da primeira etapa, ou seja, o modelo da geometria dos filões é condicionado à intensidade linear estimada na primeira etapa.

Depois de simulados os esqueletos dos filões, ou sejam, os arcos que estruturam a morfologia dos filões, na etapa final são associadas possanças e faz-se uma avaliação quantitativa das razões dos volumes (filão versus rocha encaixante) e respectiva incerteza.

3.3 ESTIMAÇÃO DA INTENSIDADE LOCAL DE FILÕES

3.3.1 APRESENTAÇÃO DA VARIÁVEL NÚMERO DE FILÕES POR METRO LINEAR - NFM

Para caracterizar a intensidade local de filões utilizou-se a variável regionalizada “número de filões por metro linear - NFM”. Esta variável é medida nas sondagens e é de fácil caracterização num depósito como a Panasqueira, porque as sondagens são verticais e os filões sub-horizontais pelo que não é necessário qualquer correcção ou analogia geométrica.

Para o presente caso de estudo foi considerada uma malha larga com 30m x 30m x 30m, o que sugere que a modelação geométrica dos filões seja feita por perfis 2D espaçados de 30 metros.

A informação de partida do número de intersecções nas sondagens foi avaliado para troços coincidentes com a malha de $d=30$ metros. A variável NFM é calculada dividindo o número de filões intersectados pelo comprimento total de sondagens que está contido no interior do bloco; as intersecções são contabilizadas pela posição do centro de gravidade. Aqui podem ter ocorrido as situações ilustradas na figura 3.5 e que foram processadas da seguinte maneira:

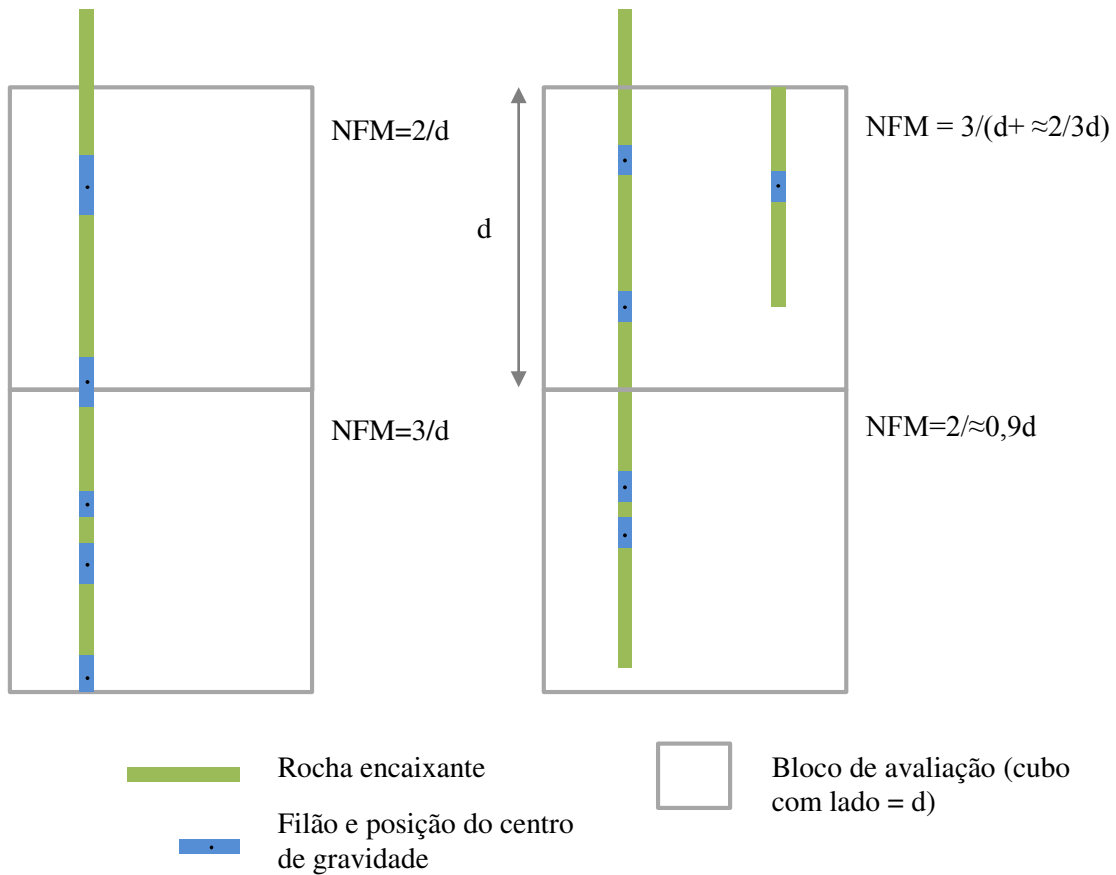


Figura 3.5 Procedimento de contabilização do número de intersecções de filões na localização das sondagens

Observou-se que a variável NFM exibe um comportamento não estacionário da média, para cotas mais superficiais o valor de NFM é baixo, aumenta em profundidade, e depois para as zonas, mais profundas volta a baixar muito. Na prática, os filões ocupam uma estreita faixa de cotas, pelo que na estimação desta variável é necessário utilizar um estimador que tenha em atenção a não estacionariedade.

Entre os vários métodos da estimação geoestatística que podem ser utilizados para a estimação considerou-se a krigagem com deriva externa, ou seja, o que se faz é a estimação dos resíduos ou diferenças $R(x)$ do valor da variável $NFM(x)$ relativamente a uma tendência $NFM^t(x)$.

$$R(x) = NFM(x) - NFM^t(x)$$

A tendência foi calculada como o valor médio de NFM observado nas sondagens para cada intervalo de cotas de 30 metros coincidente com a malha de blocos.

3.3.2 ABORDAGEM GEOSTATÍSTICA E KRIGAGEM COM DERIVA EXTERNA

3.3.2.1 Introdução à geoestatística

A geoestatística consiste num conjunto de ferramentas que têm por objectivo a caracterização da dispersão espacial das grandezas que definem a quantidade e a qualidade dos recursos naturais, tais como florestas, recursos geológicos, hidrogeológicos ou outros fenómenos espaciais em que os atributos manifestem uma certa estrutura no espaço (Goovaerts, 1997; Soares 2000).

Os modelos geoestatísticos resultam da associação entre a componente naturalista referente às disciplinas dos diferentes domínios onde os fenómenos são estudados – geologia, pedologia, biologia, etc. – e uma componente estrutural, que rege a distribuição e a ocorrência ordenada no espaço. Por esta razão, as mesmas ferramentas da geoestatística podem ser aplicadas a casos de estudo e variáveis tão distintas.

Os dados tratados pela geoestatística são realizações de uma variável aleatória, que são variáveis que têm associadas duas características essenciais simultaneamente: por um lado apresentam uma componente aleatória que se traduz em oscilações aleatórias mas, por outro lado, apresentam uma componente de variabilidade estruturada no espaço. Este tipo de variáveis que apresentam uma certa estrutura podem ser chamadas Variáveis Regionalizadas (VR). É na teoria das VR que se baseia toda a geoestatística (Journel e Huijbregts, 1978).

As metodologias assentam basicamente num conjunto de instrumentos estatísticos, que quantificam a continuidade espacial da grandeza em estudo – variogramas ou covariâncias espaciais (neste caso, o NFM) e em modelos de interpolação espacial, tendo por base a sua variabilidade estrutural.

Algumas características de distribuição das VR no espaço são:

- a) Continuidade – é a medida da variação espacial da VR. Apesar da complexidade das flutuações verificadas existe, em geral, uma componente com continuidade. Contudo, existem casos em que essa continuidade não se verifica. Nestes casos diz-se que existe efeito de pepita, que será mencionado mais à frente
- b) Anisotropias – em certos casos devido a fenómenos direccionais particulares, a continuidade em determinada direcção pode ser diferente da que se verifica noutra direcção. Por exemplo, numa camada sedimentar, é de esperar uma variação muito mais regular ao longo dessa camada do que na direcção perpendicular.

3.3.2.2 Variografia e ajuste de modelos teóricos

A ferramenta essencial da geoestatística destinada a quantificar a continuidade espacial é o variograma $\gamma(h)$ (Journel e Huijbregts, 1978). É a partir desta função matemática que são efectuadas todas as estimações e afectadas por um erro.

O variograma experimental é calculado pelo valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos – amostras – distanciados do vector \vec{h} , onde na prática para um conjunto de amostras $y(x_i)$ é calculado por (Goovaerts, 1997; Soares, 2000):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [y(x_i) - y(x_i + h)]^2$$

onde $N(h)$ é o número de pares de dados distanciados de h e $y(x_i)$ o valor que a VR toma na localização x_i .

A figura 3.6 mostra uma representação gráfica do variograma em função da distância. Aqui espera-se que os pontos do variograma experimental distribuam-se de forma crescente à medida que a distância entre os pares de pontos aumenta.

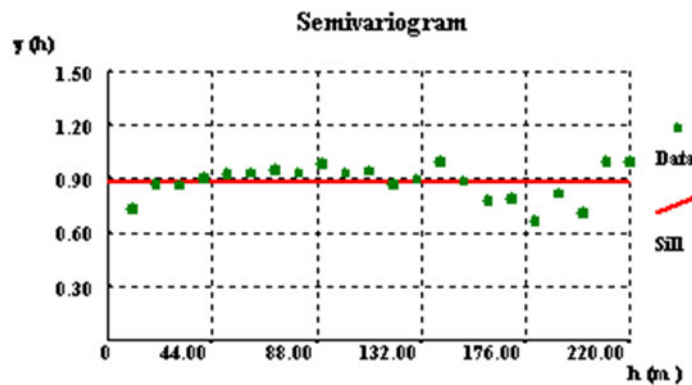


Figura 3.6 Representação dos pontos de um variograma experimental para uma dada direcção em função da distância que separa os pares de amostras.

A partir de uma certa distância a , dita *amplitude* (distância a partir do qual as amostras se tornam independentes), o variograma aproxima-se do patamar (reflecte a dispersão própria do fenómeno para distâncias superiores à amplitude), que coincide com a variância *a priori* das amostras.

Outro parâmetro do variograma é o chamado *efeito de pepita*, que corresponde à ordenada na origem. Representa o valor do variograma para distâncias inferiores ao menor espaçamento da amostragem e, simultaneamente, a variabilidade da variável para pequenas distâncias. Transporta informação de possíveis erros de amostragem e a variabilidade intrínseca do fenómeno em estudo relativamente à menor distância amostrada.

O variograma é calculado e avaliado por direcções (Journel e Huijbregts, 1978). Podem surgir comportamentos diferentes por direcção e, neste caso, diz-se que tem comportamento anisótropo. Como já foi dito, num jazigo estratiforme, é de esperar que o variograma calculado no sentido da estratificação seja muito diferente do que o variograma calculado na direcção perpendicular em que a independência entre amostras estará ligada à espessura média dos estratos.

Depois de calculados os variogramas experimentais para vários passos h crescentes, com base num conjunto de amostras de uma área A , é necessário ajustar um modelo teórico, ou seja, ajustar os pontos experimentais obtidos por uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros, que quantifique a continuidade espacial.

O ajustamento do variograma experimental por um modelo teórico é condicionado pelo conhecimento prévio do caso de estudo. Na geoestatística são utilizados modelos teóricos que cobrem a generalidade das situações de dispersão dos fenómenos espaciais. Os modelos teóricos mais utilizados nas Ciências da Terra são o esférico e o exponencial.

O ajustamento faz-se idealmente por um processo gráfico e interactivo, onde o utilizador ajusta visualmente a melhor posição da curva do modelo teórico sobre os pontos experimentais. O ajustamento introduz subjectividade de propósito, por exemplo, na justificação para a ocorrência de anisotropias, efeito de pepita e ponderação relativa entre os vários pontos do variograma experimental.

3.3.2.3 Estimação por krigagem normal

Segundo a estatística clássica, o melhor estimador de uma população de variáveis independentes reconhecida através de um conjunto de amostras é a média dos valores amostrados. Mas como já se viu anteriormente, a estatística clássica não toma em consideração a estrutura subjacente ao fenómeno, traduzida pela correlação espacial de cada variável.

Em 1965, Matheron desenvolveu os estimadores lineares de krigagem, sendo estes obtidos pela combinação linear de toda a informação disponível, e em que os ponderadores (λ) devem cumprir as regras de não enviesamento e de minimização de variância de estimação, assim

como serem capazes de desagregar agrupamentos de amostras. Existem várias variantes de estimadores de krigagem, sendo a mais utilizada a krigagem normal ou ordinária, que é um estimador monovariado ou de uma variável (Journel e Huijbregts, 1978).

Na krigagem, o estimador de uma VR para uma localização não amostrada não é uma média simples, geometricamente ponderada dos valores amostrados na zona a estimar, mas uma combinação linear desses valores que toma em conta as respectivas posições relativas e, principalmente, a ligação estrutural existente entre as amostras e a localização a estimar.

O estimador de krigagem normal é na prática uma combinação linear do conjunto de N amostras vizinhas da localização a estimar x_0 (Goovaerts, 1997; Soares, 2000):

$$[y(x_0)]^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{OK} \cdot y(x_i)$$

Este estimador cumpre os dois critérios seguintes: não-enviesamento e variância de estimação mínima. Para além de considerar apenas uma variável, considera ainda a estacionariedade da média, apesar de esta ser desconhecida.

3.3.2.4 Krigagem com deriva externa

A estimação por krigagem com deriva externa (KED) é uma variante da krigagem universal. Ao contrário da krigagem normal, a KED é um estimador que se apoia em dados de uma variável auxiliar, relativamente à qual a variável principal tem grande dependência. A variável secundária tem de ser conhecida em todas as localizações a estimar, configura por isso uma tendência ou deriva (Journel e Huijbregts, 1978; Batista *et al*, 2001).

Na KED considera-se uma deriva externa $m(u)$ que é modelada como uma função linear de uma variável secundária $y(u)$:

$$m(u) = a_0(u) + a_1(u) \cdot y(u)$$

A relação entre $y(u)$ e $m(u)$ tem de ser linear, caso contrário tem de se efectuar uma transformação sobre $y(u)$ de modo a tornar esta relação linear.

O estimador de krigagem com deriva externa é:

$$[z(x_0)]^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KED} \cdot z(x_i)$$

A deriva externa obtida a partir de uma variável secundária $y(u)$ é introduzida directamente no sistema de krigagem através de uma condição adicional:

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha}^{KED}(u) \cdot y(u_{\alpha}) = y(u)$$

A principal e única vantagem da KED é que toma em consideração a forma de uma variável externa; os principais inconvenientes são que a deriva tem de ser conhecida nas amostras e locais a estimar, o variograma é ajustado aos resíduos, os valores estimados em extrapolações e locais mal amostrados é muito dependente da deriva, muitas vezes o sistema de krigagem é instável e não controla a relação entre médias locais e a deriva conhecida porque a deriva pode estar noutra escala de valores completamente diferente da variável principal.

3.4 MODELAÇÃO DA GEOMETRIA DOS FILÕES POR OBJECTOS

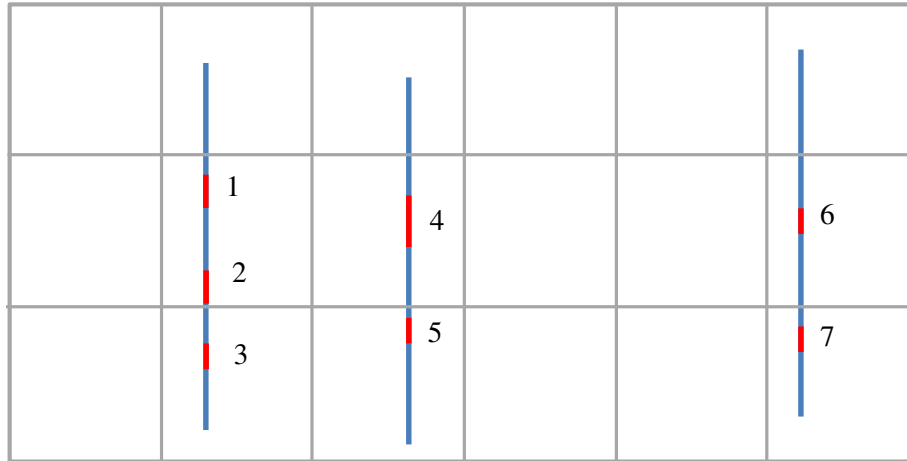
Para a modelação da geometria dos filões por objectos optou-se por uma metodologia de geração dos objectos a 2D por simulação estocástica. São considerados vários perfis verticais, coincidentes com a malha de blocos utilizada na etapa anterior e onde foi estimado o número de intersecções de filões por metro linear (NFM) na direcção das sondagens, ou seja, a vertical. Em conjunto, os perfis cobrem todo o volume de estudo e sem sobreposições.

Na geração das linhas poligonais / esqueleto dos filões consideram-se as seguintes etapas:

- 1) Representação de todos os troços de sondagem na zona de influência do perfil ($y = y_p$), os troços de sondagem podem ser do tipo filão p_{Fi} ou rocha encaixante p_{RE_i} (figura 3.7). Determinação das coordenadas do centro de gravidade para cada troço de tipo filão:

$$x_{Fi}^{cg}, y_{Fi}^{cg}, z_{Fi}^{cg}$$

- 2) Identificação de todas as ligações potenciais entre os centros de gravidade dos filões, cruzando todas as possibilidades, ou seja, começar com a primeira intersecção da primeira sondagem e tentar ligar sucessivamente com todas as restantes e assim por diante até à última sondagem (ver figura 3.8).



1) Figura 3.7 Representação das sondagens e intersecções com os filões num perfil e sobreposição com a malha de blocos. Os troços de sondagem a vermelho indicam o filão e os troços a azul a rocha encaixante.

Cada ligação potencial corresponde a um segmento de recta que liga pares de vértices coincidentes com os centros de gravidade dos troços de intersecção de uma sondagem com um filão. Como os filões são sub-horizontais, excluir logo as ligações entre filões da mesma sondagem, por exemplo (1;2), (2;3) e (1;3), e excluir também todos os que tenham uma inclinação superior em valor absoluto a um ângulo máximo ($|\rho_{ij}| > \rho_{\text{máx}}$), por exemplo (1;5) e (3;4). São ainda excluídas as ligações que intersectem qualquer troço de sondagem, quer seja de rocha encaixante quer seja de filão (por exemplo, (1;6), (2;7), etc.) ou que tenham comprimento superior a um limite máximo previamente definido.

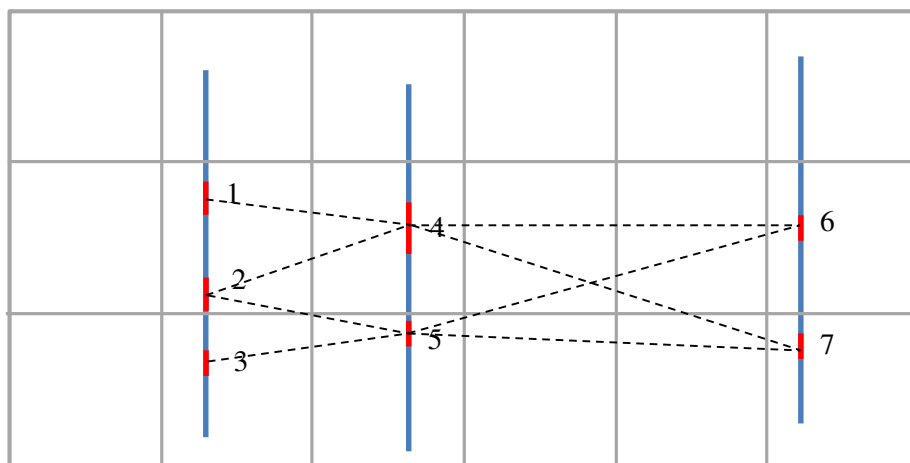


Figura 3.8 Representação a tracejado das ligações possíveis entre sondagens limitadas ao ângulo máximo de inclinação que para efeitos ilustrativos se considerou 20° .

- 3) Iniciar uma linha poligonal ou esqueleto do filão. De todas as ligações potenciais, escolher uma ao acaso por sorteio. Percorrer todas as restantes, e daquelas que têm nós envolvidos na ligação escolhida, excluir as que façam ângulos internos superiores a um valor previamente estabelecido, mas superior a 90° (por exemplo, mais de 135°). Pretende-se excluir potenciais ligações que gerem situações de um filão que volta para trás, que geologicamente seria uma dobra. Na figura 3.9 mostra-se um exemplo onde foi escolhida a ligação (4;6) e, por consequência, ficam excluídas as ligações (4;7) e (6;5) porque os seus ângulos são inferiores a 90° . Os ângulos $\widehat{6;4;7}$ e $\widehat{4;6;5}$ são francamente inferiores a 90° , já o ângulo $\widehat{1;4;6}$ é francamente superior e, neste caso, próximo de 180° .

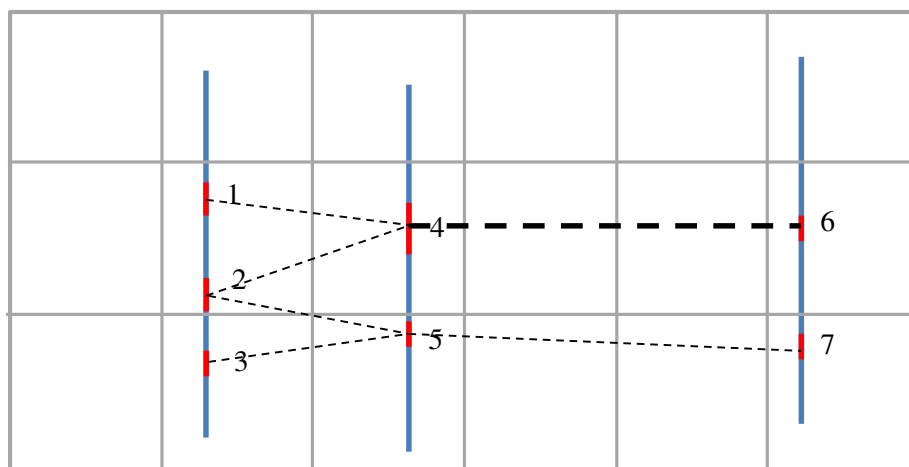


Figura 3.9 Representação a tracejado mais espesso da ligação seleccionada (4;6) e exclusão das ligações (4;7) e (6;5).

- 4) Na ligação escolhida, sortear o primeiro ou o último vértice (nó). A partir do nó escolhido, seleccionar as ligações que incluem esse nó e sortear uma ao acaso. Por exemplo, a partir da ligação (6;4) as ligações (4;1) e (4;2) são candidatas, se for sorteada a ligação (4;1) fica de parte a ligação (2;4) (figura 3.10). Depois desta escolha, continuar o procedimento até que o primeiro ou último nó da linha poligonal que está a ser gerada não tenha mais ligações candidatas. Finalmente, são simuladas as terminações da linha poligonal (filão), nas duas extremidades. Para tal são acrescentados mais dois segmentos de recta, um no início e outro no fim. Adoptou-se por um comprimento máximo de 30 m (dimensão do bloco) e por um ângulo de prolongamento entre 150° e 210° , ou seja, 30° de tolerância relativamente a um prolongamento a direito que corresponde ao ângulo de 180° . Tanto o comprimento do lado como o ângulo são gerados por Monte Carlo a partir de uma lei uniforme entre estes valores nos intervalos $[0; 30\text{m}]$ e $[150^\circ; 210^\circ]$. As extensões que ficarem fora do

limite da malha de blocos não são consideradas em termos de cálculo de volumes. Na figura 3.11 mostra-se o resultado possível destas extensões com a adição de dois novos nós com os índices 8 e 9.

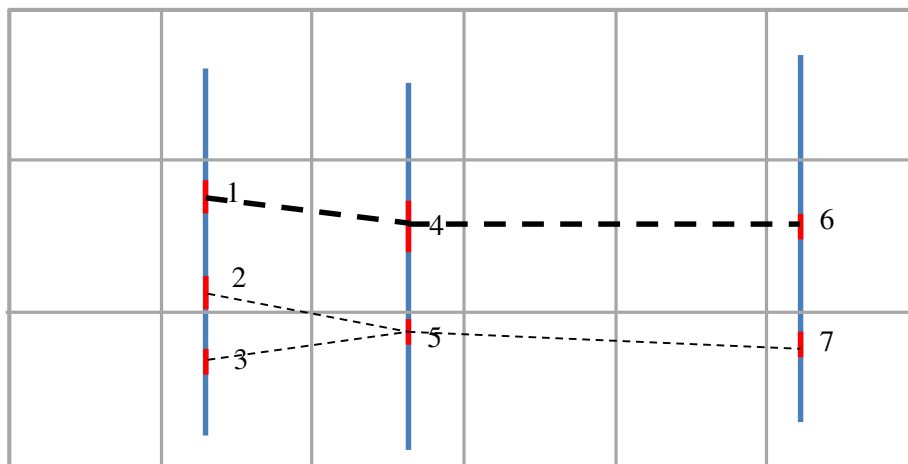


Figura 3.10 Evolução da simulação do filão, que neste momento fica com as ligações entre os nós (1;4;6).

- 5) Passar para o filão seguinte, retomando para isso as etapas 3) e 4). A simulação de todos os filões termina quando não existirem mais intersecções livres.

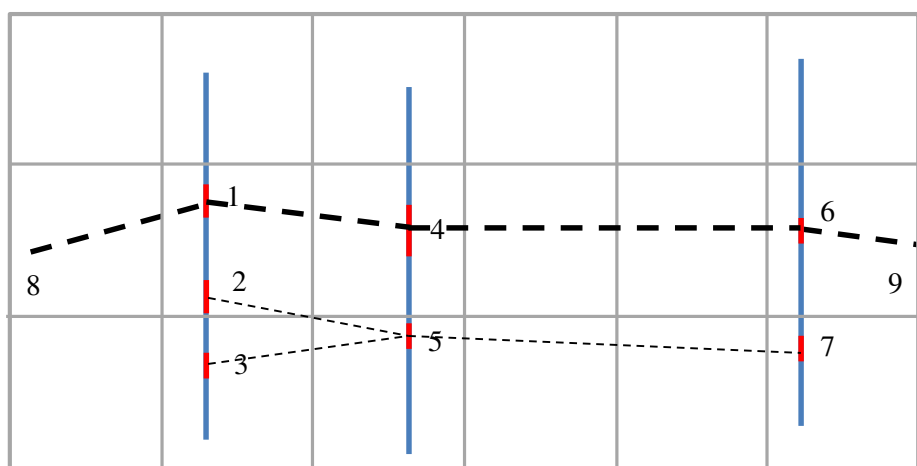


Figura 3.11 Finalização do filão com as extensões inicial e final, que neste momento fica com as ligações entre os nós (8;1;4;6;9).

Na fase final da simulação, pode acontecer que os nós remanescentes não tenham ligações potenciais. É o que acontece na figura 3.12 depois de gerado o segundo filão (10;3;5;7;11) a

intersecção 2 fica sem ligações. A solução para estas intersecções isoladas é gerar duas terminações, uma para cada lado, como se tratasse de uma linha poligonal. O resultado final pode ser então visualizado na figura 3.12. Se os segmentos das extensões intersectarem outro filão ou uma sondagem, a extensão termina no ponto de intersecção. Ainda no caso da figura 3.12, a extensão para a esquerda do nó 2 gera uma intersecção que é registada como o vértice / nó 12.

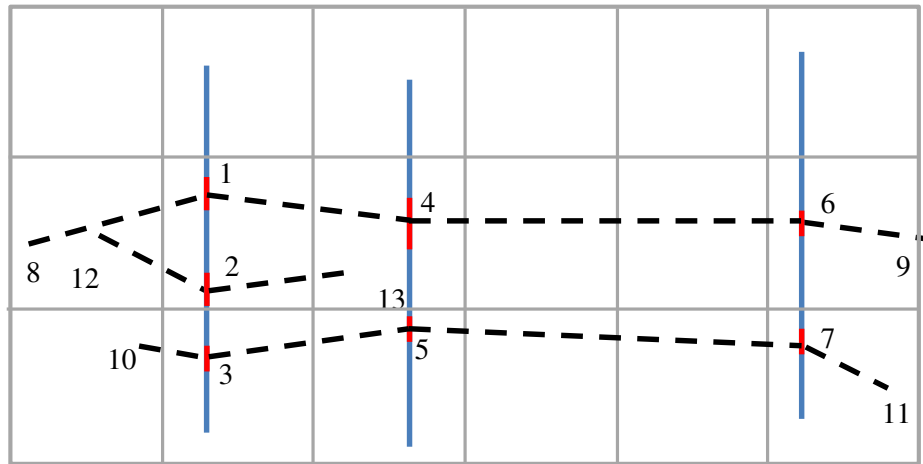


Figura 3.12 Finalização da simulação dos filões que ficam com as três linhas poligonais (8;12;1;4;6;9), (12;2;3) e (10;3;5;7;11).

Depois de terminada a simulação que envolve a construção das ligações possíveis dos filões amostrados nas sondagens, faz-se a avaliação do modelo face ao objectivo da variável NFM estimada para cada bloco por KED e determinam-se o desvio em cada bloco D_{ijk} e o desvio total D_T :

$$D_{ijk} = NFM_{ijk}^{modelo} - NFM_{ijk}^{KDE}$$

e

$$D_T = \sum_i \sum_j \sum_k D_{ijk}$$

Se os desvios forem positivos, é porque a NFM do modelo é superior ao objectivo estimado por KED o que não acontece quando a simulação dos filões utiliza somente as intersecções das sondagens. No caso de serem negativos, o normal na primeira iteração de geração dos filões, é porque a NFM do modelo é inferior ao objectivo, ou seja, é necessário simular mais filões.

Assim, para todos os blocos onde o desvio é negativo, ou seja, faltam filões, são adicionadas na área de estudo, aleatoriamente e por iteração, um conjunto de p intersecções não observadas ou virtuais. Estas intersecções virtuais são adicionadas proporcionalmente em função do défice calculado para cada bloco entre o NFM (objectivo estimado por KED) e o NFM do modelo. Estas intersecções em falta são posicionadas aleatoriamente no volume do bloco em défice que foi seleccionado. Depois de adicionados estes nós, o modelo é re-simulado novamente nos passos 2), 3) e 4) sendo posteriormente reavaliado.

As intersecções virtuais são posicionadas primeiro pelo sorteio de um bloco e depois pelo sorteio de uma posição perfeitamente aleatória no bloco. Para sortear os blocos, de forma a serem escolhidos proporcionalmente ao défice que exibem, é construída uma lei pseudo-cumulativa sendo os blocos gerados por Monte Carlo. Por exemplo, se existirem 5 blocos em défice com os valores de 0,34; 0,21; 0,1; 0,1 e 0,7 a lei é construída do modo ilustrado na figura 3.13. O sorteio do bloco tem em conta a magnitude do desvio, sendo escolhidos mais vezes blocos com maior desvio.

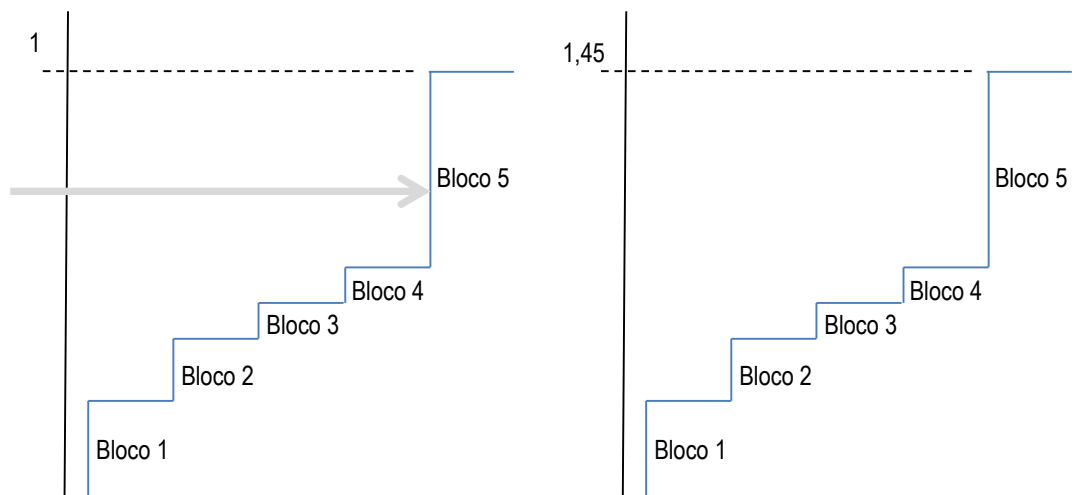


Figura 3.13 Geração de uma lei pseudo-cumulativa com a magnitude dos desvios (à direita), re-escalamento para o intervalo $[0; 1]$ e simulação de Monte Carlo.

De acordo com a reavaliação, adicionam-se novamente mais filões nos blocos deficitários. No final de cada iteração, deve-se representar graficamente o valor do desvio total em função do índice da iteração. É de esperar um comportamento como o que é indicado na figura 3.14, existindo um valor óptimo de filões por região a atingir com o qual a simulação deve parar.

Importa referir que este é um processo de simulação, e que iniciando-se a simulação por outra intersecção, e escolhendo-se outras ligações, são gerados cenários diferentes. A imagem 3.15 mostra dois cenários simulados finais e que hipoteticamente cumprem todos os requisitos.

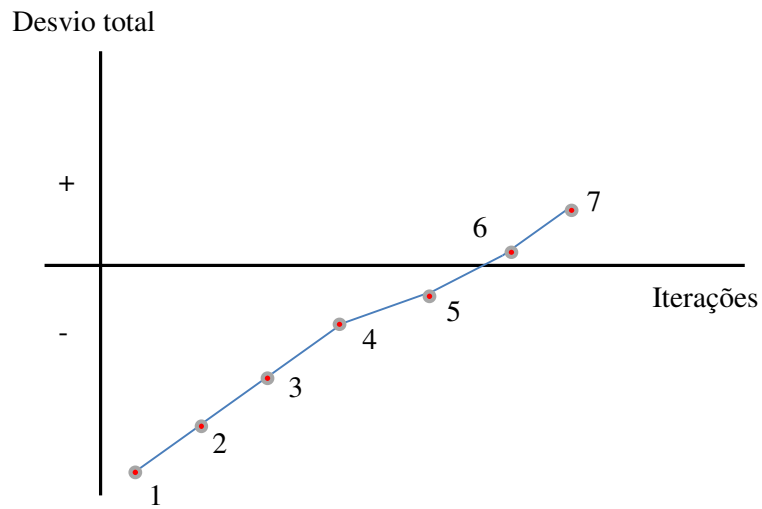


Figura 3.14 Representação dos desvios por iteração e identificação da iteração a que corresponde os menores desvios em valor absoluto neste caso seria a 6. Em cada iteração são adicionadas p intersecções virtuais.

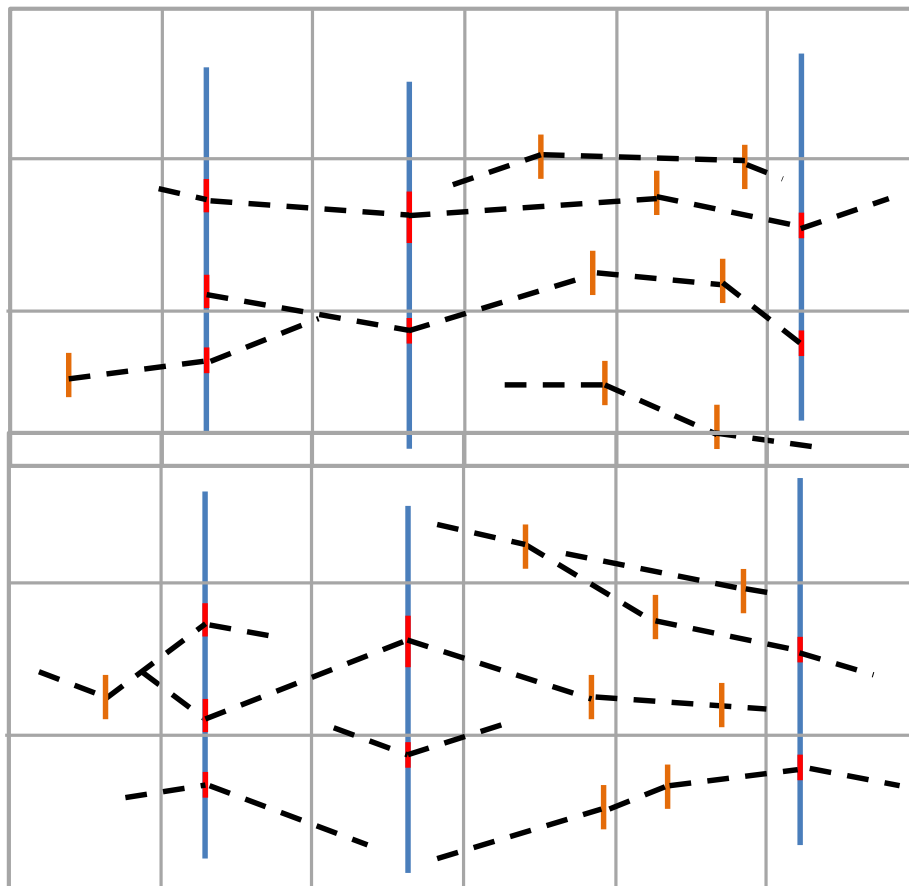


Figura 3.15 Representação de duas realizações equiprováveis do campo de filões. Os traços a cor de laranja representam localizações potenciais de filões não amostrados pelas sondagens. O conjunto das intersecções (observadas ou virtuais) é processado do mesmo modo.

3.5 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA RELAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS FILÕES COM A ROCHA ENCAIXANTE

No final de cada simulação o resultado é um conjunto de linhas poligonais que representam a 2D a possível distribuição espacial dos filões no perfil seleccionado. Topologicamente, cada linha poligonal é representada por uma sequência ordenada de vértices com coordenadas x , y e z conhecidas. Importa referir que para efeitos de avaliação de quantidades, estas linhas representam uma largura de influência equivalente ao espaçamento entre perfis, ou seja, à dimensão dos blocos.

Com esta informação das linhas poligonais, e tendo por objectivo quantificar a relação volumétrica dos filões com a rocha encaixante, para cada filão pode-se determinar o seu comprimento e volume.

Conhecida a lista de coordenadas dos n nós constituintes de cada filão, o comprimento do filão C_F é um cálculo elementar e consiste em somar todos os comprimentos dos segmentos de recta que o constituem.

$$C_F = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$$

Para o cálculo dos volumes é necessário associar a largura e a possança. A largura é a distância entre perfis, ou seja, a dimensão do bloco. Para a possança estabeleceram-se as regras de que nas extremidades é zero e que ao longo do filão são determinadas, ou pelo valor amostrado na sondagem (no caso de vértices resultantes de sondagens) ou por simulação de Monte Carlo (para os vértices gerados aleatoriamente em localizações não amostradas) (figura 3.14). Desta forma, se L for a extensão lateral de influência de um perfil, o volume V_F de um filão, constituído por n vértices, com comprimento entre pares de vértices consecutivos $C_{F_{ij}}$, e conhecidas a possança em cada vértice p_i , é expresso por:

$$V_F = \left[\frac{C_{F_{12}}(0 + p_2)}{2} + \frac{C_{F_{n-1,n}}(p_{n-1} + 0)}{2} + \sum_{i=2}^{n-2} \left[C_{F_{i,i+1}} \frac{(p_i + p_{i+1})}{2} \right] \right] \cdot L$$

O volume do filão pode também ser calculado para cada bloco. Com os volumes de filão, por bloco e globais, podem ser calculados o índice de volume de filão versus volume de rocha encaixante, também por bloco e global.

No presente caso de estudo foram simulados vários cenários de filões, onde para cada cenário são apresentados os volumes globais. As estatísticas variância e coeficiente de variação são os indicadores de incerteza e refletem o balanço do conhecimento do volume potencialmente mineralizado.

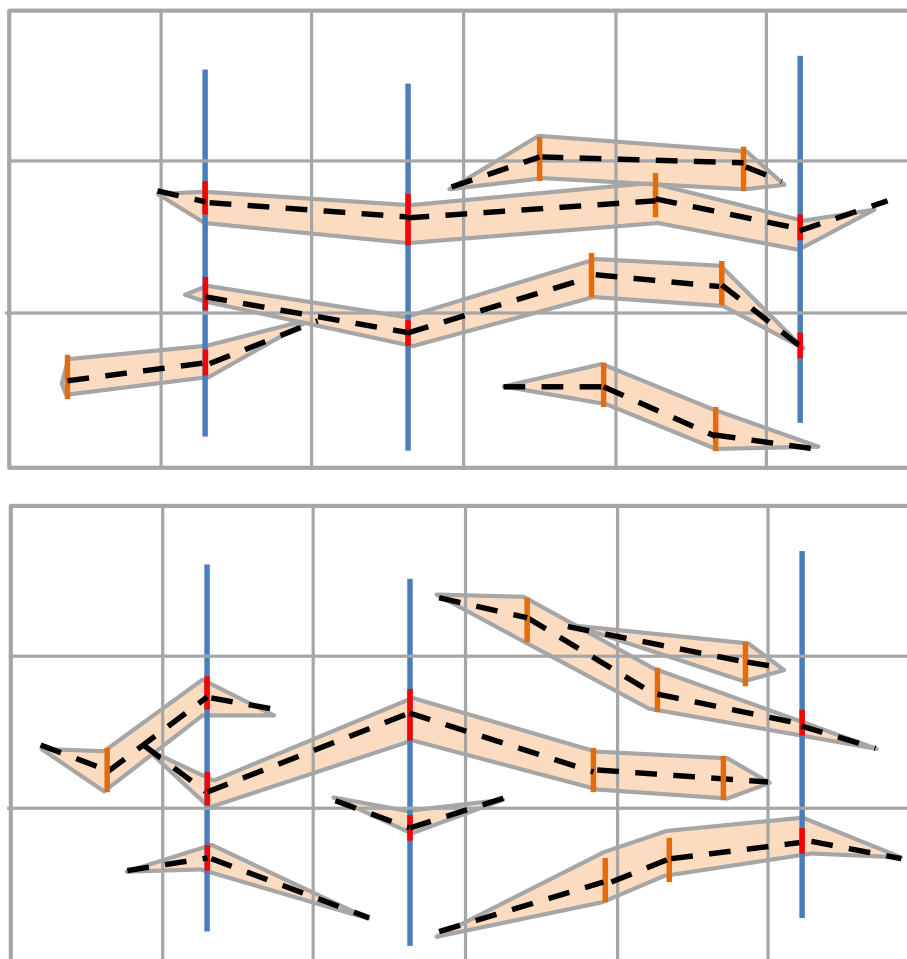


Figura 3.16 Representação de duas realizações equiprováveis do campo de filões e respectivas possanças.

4. CASO DE ESTUDO

Para a ilustração da construção do modelo dos filões por objectos utilizaram-se dados da Mina da Panasqueira. Por razões de confidencialidade as coordenadas foram rodadas e translacionadas de um determinado ângulo e distância que não são referidos neste texto.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E MALHA DE BLOCOS

A informação foi disponibilizada no formato de tabela e inclui um conjunto muito variado de informação, onde se inclui a informação geográfica das sondagens e intersecções com filões e a informação mineralógica das intersecções com filões e respectiva abundância. Para a área em estudo foram identificadas 363 sondagens verticais, ascendentes e descendentes. Desta informação disponível foi utilizada a seguinte:

- Coordenadas X, Y e Z da boca da sondagem;
- Metragem total furada;
- Orientação da sondagem, se de cima para baixo ou de baixo para cima;
- Distância mínima e máxima de cada intersecção com um filão à boca da sondagem.

A informação mineralógica não foi considerada neste estudo.

O primeiro processamento dos dados, para além da rotação e translação do conjunto, consistiu em obter um ficheiro com as coordenadas de início e fim de cada troço de sondagem, quer seja de filão quer seja de roncha encaixante. Ao todo foram identificadas 2636 intersecções com filões e 2999 troços de rocha encaixante, a que correspondem, respectivamente, os comprimentos acumulados de 224,94 m e 10878,09 m.

Seguidamente, iniciou-se uma malha de blocos de baixa resolução, tendo-se optado por blocos cúbicos com 30 metros de lado, totalizando 2160 blocos. A tabela 4.1 sintetiza os parâmetros geométricos da malha de blocos.

Tabela 4.1 – Geometria da malha de blocos de baixa resolução.

Direcção	Coordenadas centro primeiro bloco (m)	Dimensão (m)	N.º de blocos
OX	4670	30	19
OY	61975	30	17
OZ	615	30	6

Na figura 4.1 mostra-se a 3D a representação das sondagens (troços de filão a amarelo e rocha encaixante a azul) e da malha de blocos na envolvente.

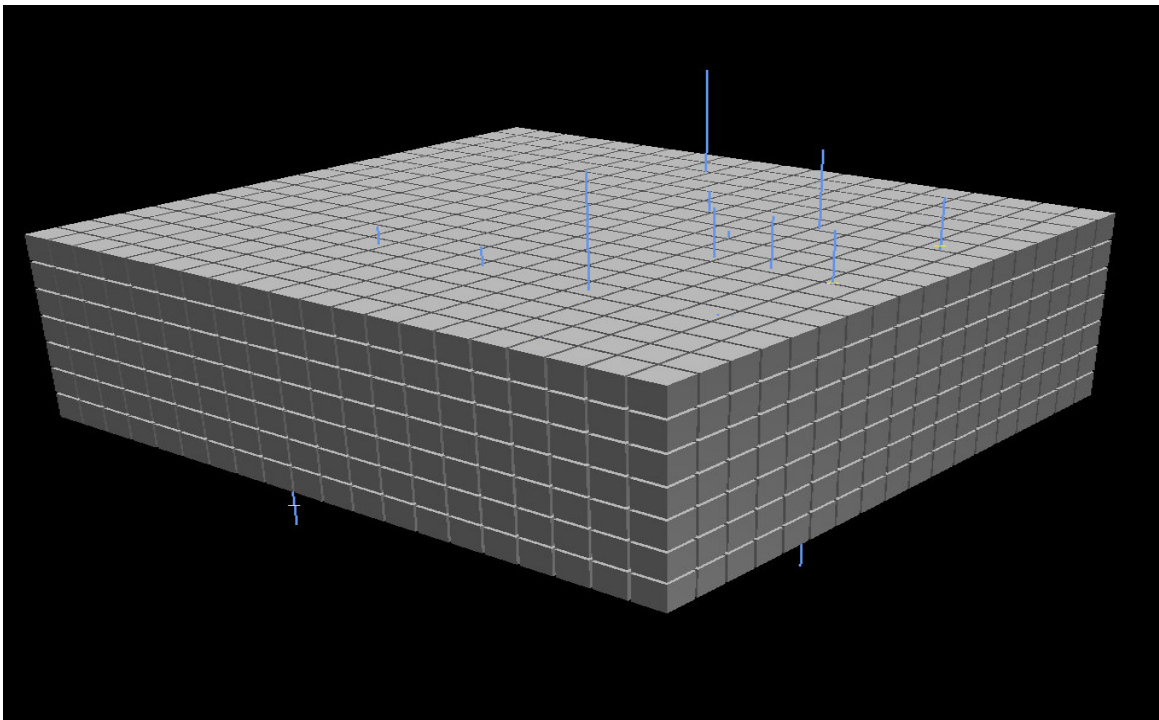
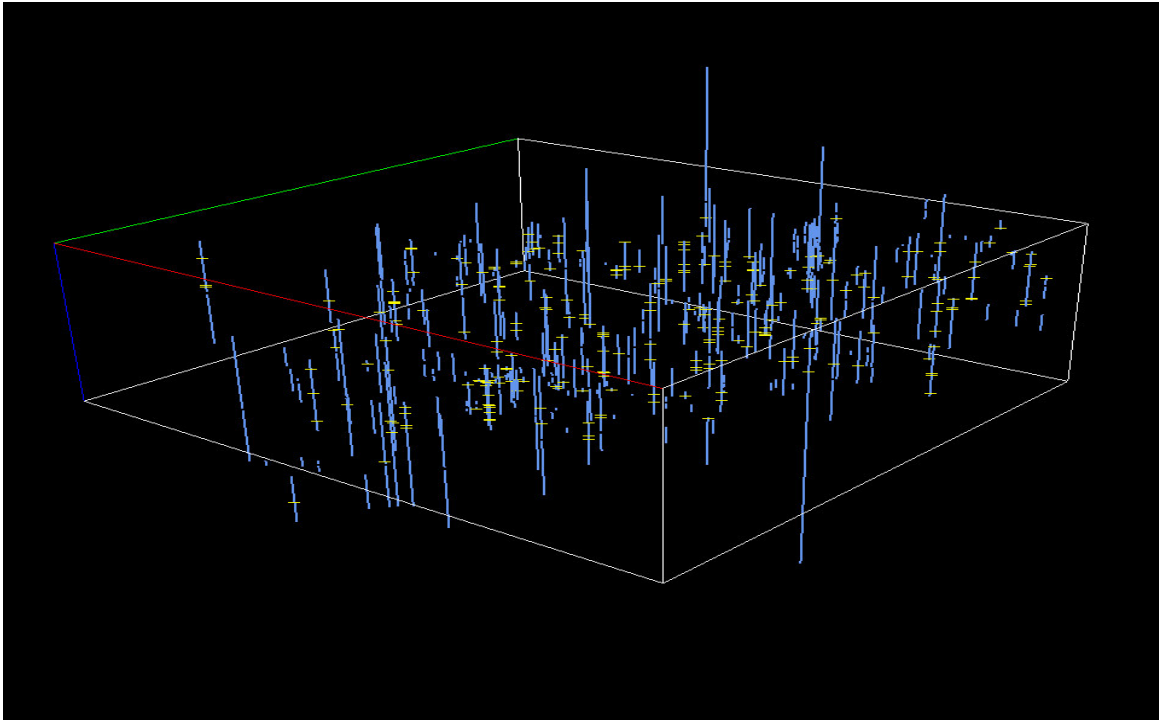


Figura 4.1 Representação 3D das sondagens a azul, intersecções com filões a amarelo e a malha de blocos a cinza. A caixa mostra a envolvente da malha de blocos.

O trabalho experimental continua com as três etapas apresentadas na metodologia, estimação da variável NFM nos blocos, simulação dos esqueletos dos filões condicionado às intensidades locais estimadas de NFM e quantificação de resultados e da incerteza.

4.2 ESTIMAÇÃO DA VARIÁVEL NFM

O indicador de intensidade de filões (NFM ou número de filões por unidade de comprimento) foi calculado na localização X, Y das sondagens para suportes homólogos à malha de blocos, isto é, para intervalos de 30 metros coincidentes em início e fim com as faces do bloco: [600m; 630m],]630m; 660m],]660m; 690m],]690m; 720m],]720m; 750m], e]750m; 780m]. No volume que é interior à malha de blocos foram encontradas 2282 intersecções com filões, para um comprimento total de sondagens de 8983,53m a que corresponde uma NFM média de 0,254, ou seja, 7,62 intersecções com filões para a altura de 30m cada bloco.

Estes valores foram desagrupados para os intervalos de cota de cada um dos seis níveis de blocos (tabela 4.2 e figura 4.2). Para confirmação da tendência na vertical mostra-se um segundo gráfico desagrupado para uma resolução vertical de 5m. Observa-se que os valores de NFM, para cotas mais próximas da superfície, rodam os 0,142, depois sobem e atingem o pico de 0,319 e regridem para 0,211 a maiores profundidades. A variabilidade desta variável em profundidade mostra que é não estacionária pelo que na estimação para a malha de blocos deve ser utilizado um estimador a que se associa uma variável secundária, que no presente estudo optou-se pela krigagem com deriva externa. Os valores da variável secundária na malha de blocos são constantes por horizonte e iguais aos que são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Síntese de resultados da intersecção das sondagens com a cota dos blocos da malha de baixa resolução.

Intervalo de cotas (m)	Nº intersecções com filões	Comprimento de sondagem (m)	NFM (m ⁻¹)	NF para o intervalo de 30 m
[600; 630]	146	690,50	0,211	6,34
] 630; 660]	479	2123,92	0,226	6,77
] 660; 690]	612	2217,61	0,276	8,28
] 690; 720]	741	2319,30	0,319	9,58
] 720; 750]	264	1349,94	0,196	5,87
] 750; 780]	40	282,26	0,142	4,25
[600; 780]	2282	8983,53	0,254	7,62

O número de intersecções com filões é menor do que o total anteriormente apresentado porque aqui apenas são tomados em conta os troços de sondagem entre as cotas 600 e 780 metros.

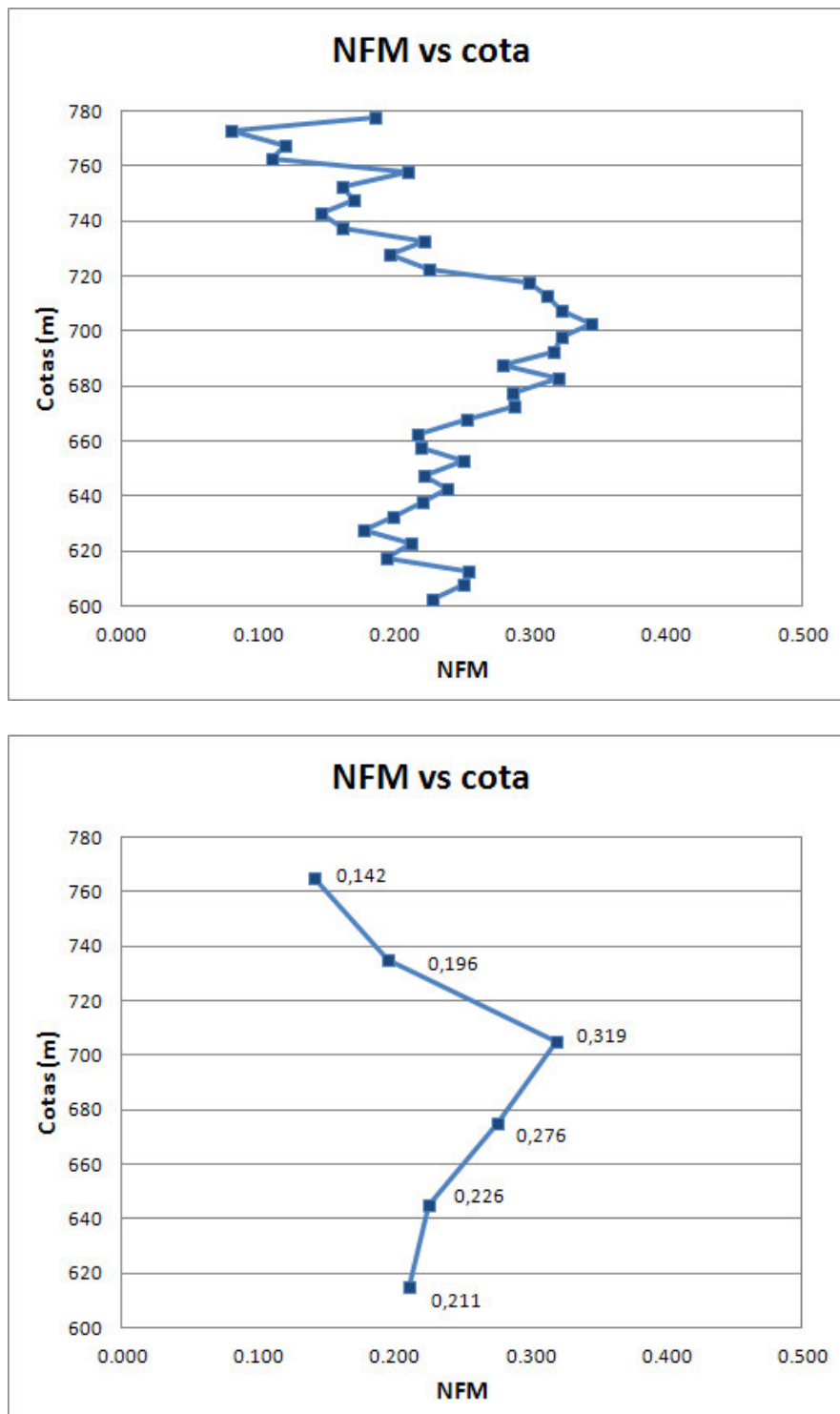


Figura 4.2 Representação dos valores médios de NFM por intervalos de cotas coincidentes com os intervalos da malha de blocos e em intervalos de 5m para confirmação da tendência. Para cotas próximas da superfície os valores são mais baixos, depois sobem em profundidade e finalmente voltam a diminuir.

A figura 4.3 mostra o histograma da variável NFM. Observa-se um comportamento muito assimétrico, e onde cerca de 20% dos troços não contém intersecções com filões num intervalo de 30 metros.

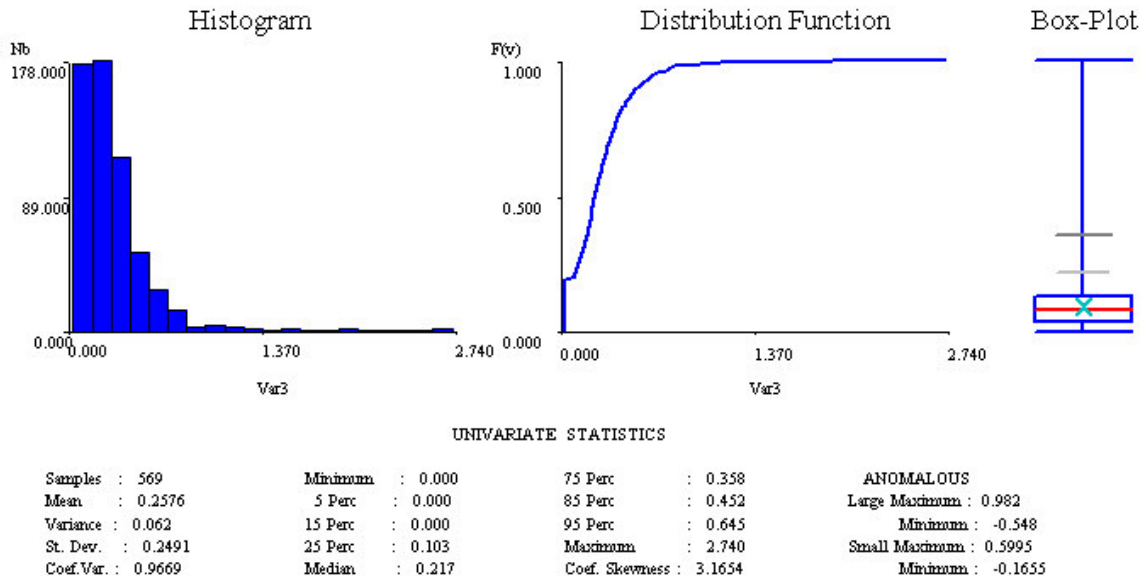


Figura 4.3 Histograma global de NFM. Os valores seguem uma lei de distribuição muito assimétrica e com cerca de 20% de zeros (não intersecções).

Para utilizar a krigagem com deriva externa calcularam-se e ajustaram-se variogramas dos resíduos $R(x_i)$, ou seja, da variável que resulta da diferença entre os valores calculados nas sondagens $NFM(x_i)$ e os valores médios por horizonte de $NFM^m(z = a)$ que refletem a tendência regional:

$$R(x_i) = NFM(x_i) - NFM^m(z = a)$$

Foram calculados variogramas experimentais e ajustados modelos teóricos para as direcções horizontal (média) e vertical que se mostram na figura 4.4. Os variogramas foram calculados para o patamar de uma unidade. Para as suas direcções foram ajustadas funções de tipo exponencial tendo sido excluídos os valores anómalos (acima de 0,5995) no cálculo do variograma da direcção horizontal. À escala do suporte de 30m, a variável NFM exhibe comportamento isotrópico com uma amplitude de 90 metros.

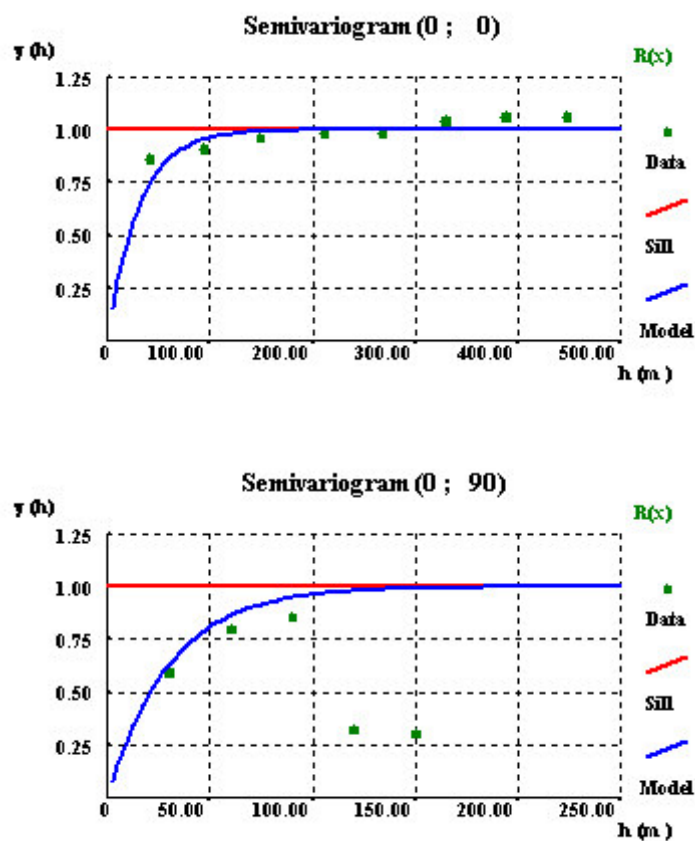


Figura 4.4 Variogramas experimentais da variável resíduos $R(x)$ para as direcções horizontal e vertical e respectivo modelo teórico isotrópico de tipo exponencial com 90 metros.

Procedeu-se à estimação por krigagem com deriva externa da variável NFM para os blocos do modelo. Na figura 4.5 mostram-se seis imagens 2D dos valores de NFM correspondentes a cada nível estimado. Na figura 4.6 mostra-se uma projeção 3D da malha de blocos enquadrada com as sondagens, vista de cima para baixo (só blocos com valores superiores a 0,2). Na tabela 4.3 comparam-se as médias por horizonte dos valores estimados e a média da tendência.

Em todas as imagens reconhece-se a tendência vertical de valores, com os níveis 3 e 4 exibindo os valores mais elevados. Observa-se também que os níveis 1 a 5 têm muitas sondagens e que o 6 já tem poucas sondagens por estar localizado a uma profundidade mais elevada e por isso ainda pouco estudada. A tabela mostra que os valores seguem a tendência, embora nalguns níveis menos amostrados os desvios sejam maiores.

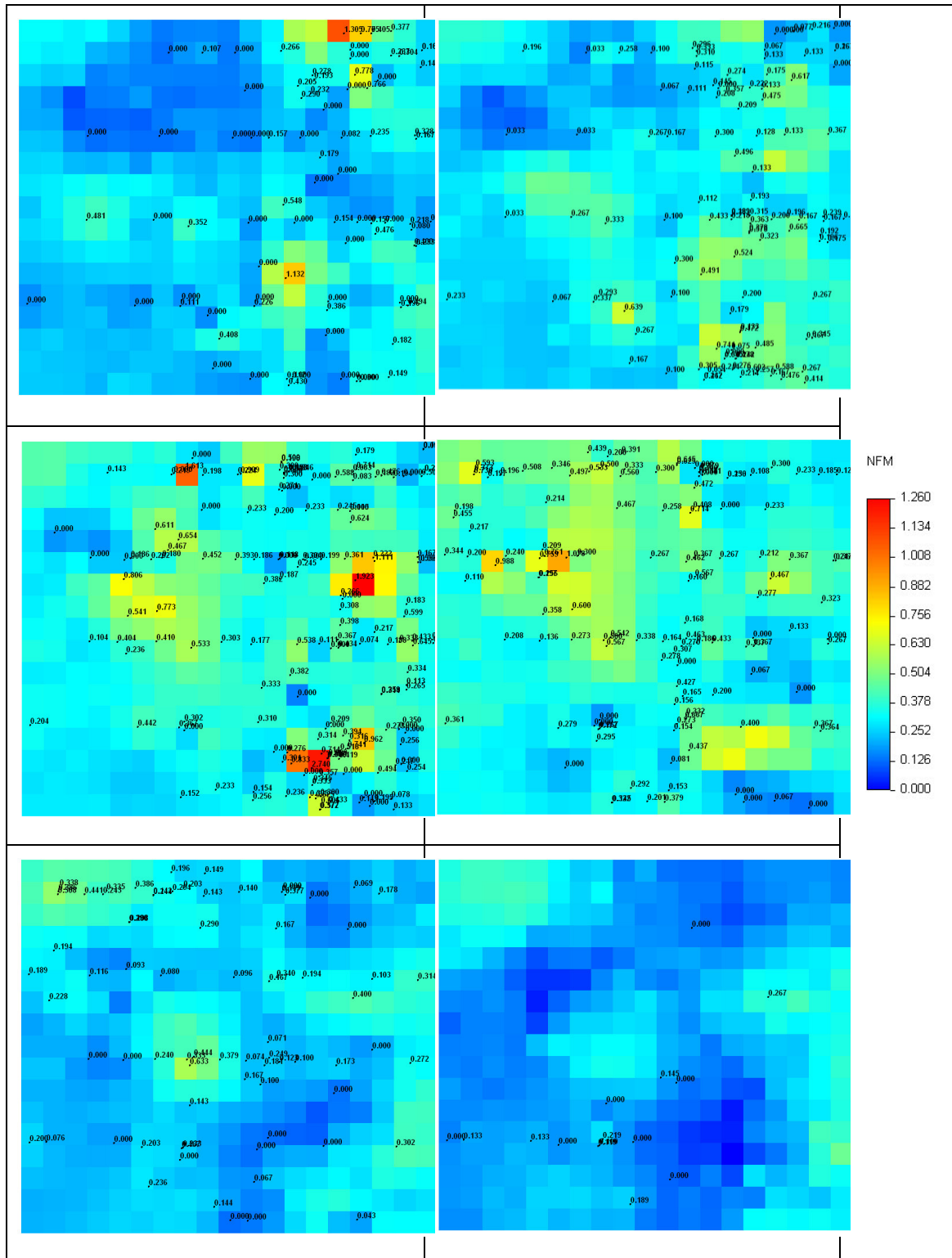


Figura 4.5 Seis imagens 2D correspondentes aos valores estimados da variável NFM na malha de blocos do modelo e dados das sondagens utilizados na estimação. Os níveis de 1 a 5 são os mais representativos e o sexto têm muito menos sondagens.

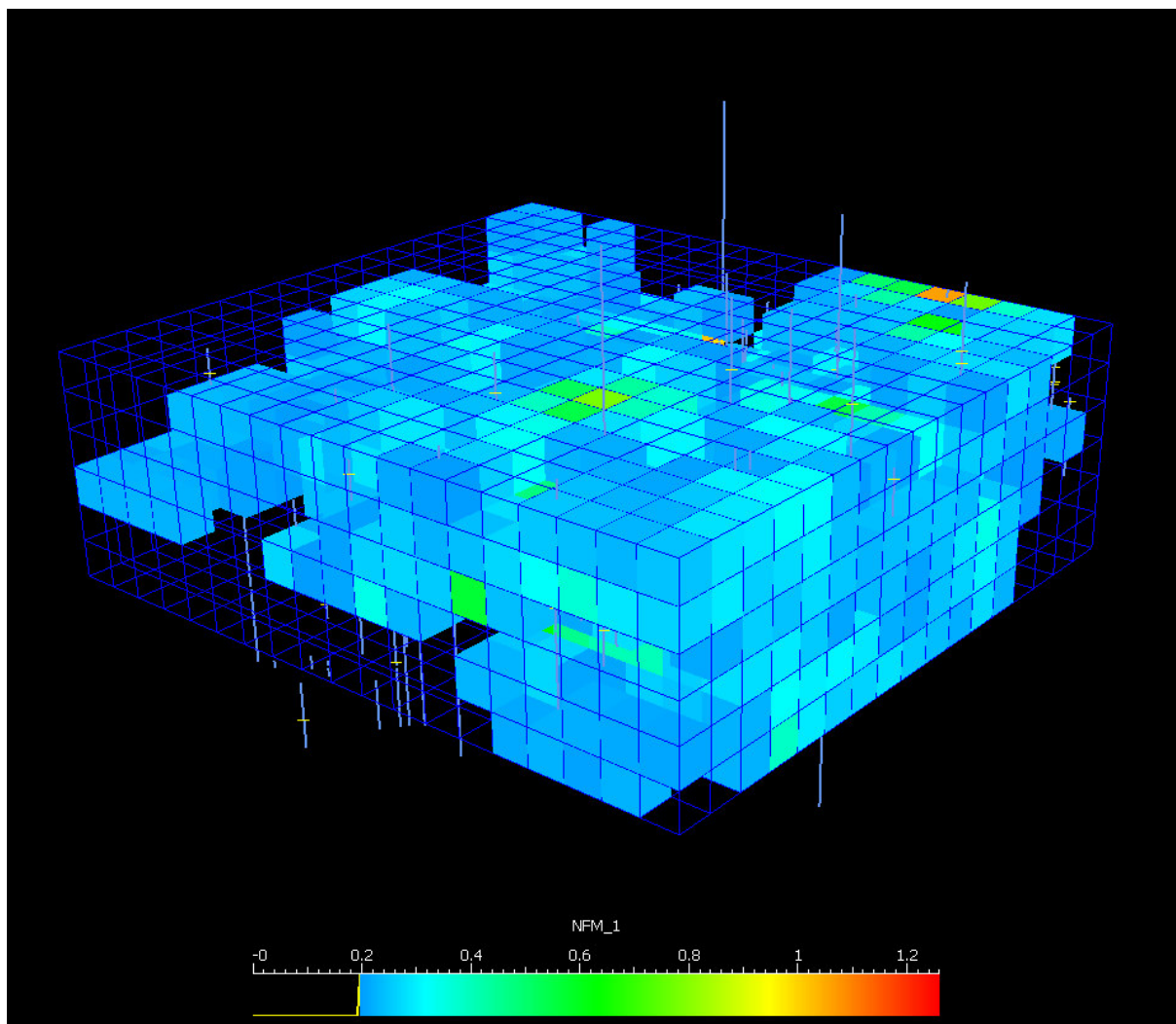


Figura 4.6 Representação 3D da malha de blocos do modelo com os valores de NFM superiores a 0,2/m e as sondagens a azul com as intersecções dos filões a amarelo.

Tabela 4.3 – Síntese de resultados da intersecção das sondagens com a cota dos blocos da malha de baixa resolução para os dados experimentais e para os valores estimados nos blocos.

Intervalo de cotas (m)	NFM dos dados (m ⁻¹)	NFM do modelo (m ⁻¹)
[600; 630]	0,211	0,168
] 630; 660]	0,226	0,216
] 660; 690]	0,276	0,278
] 690; 720]	0,319	0,288
] 720; 750]	0,196	0,164
] 750; 780]	0,142	0,111
[600; 780]	0,254	0,204

4.3 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA DOS FILÕES

Nesta etapa faz-se a simulação dos arcos correspondentes aos esqueletos dos filões. A simulação é feita a 2D, ao longo de 17 perfis longitudinais e paralelos, e com as sondagens que estiverem incluídas no intervalo de influência de 30 metros.

Na figura 4.7 mostra-se uma projecção em planta das sondagens ao longo dos 17 perfis. O número de sondagens por perfil é variado mas todos os perfis têm pelo menos uma sondagem.

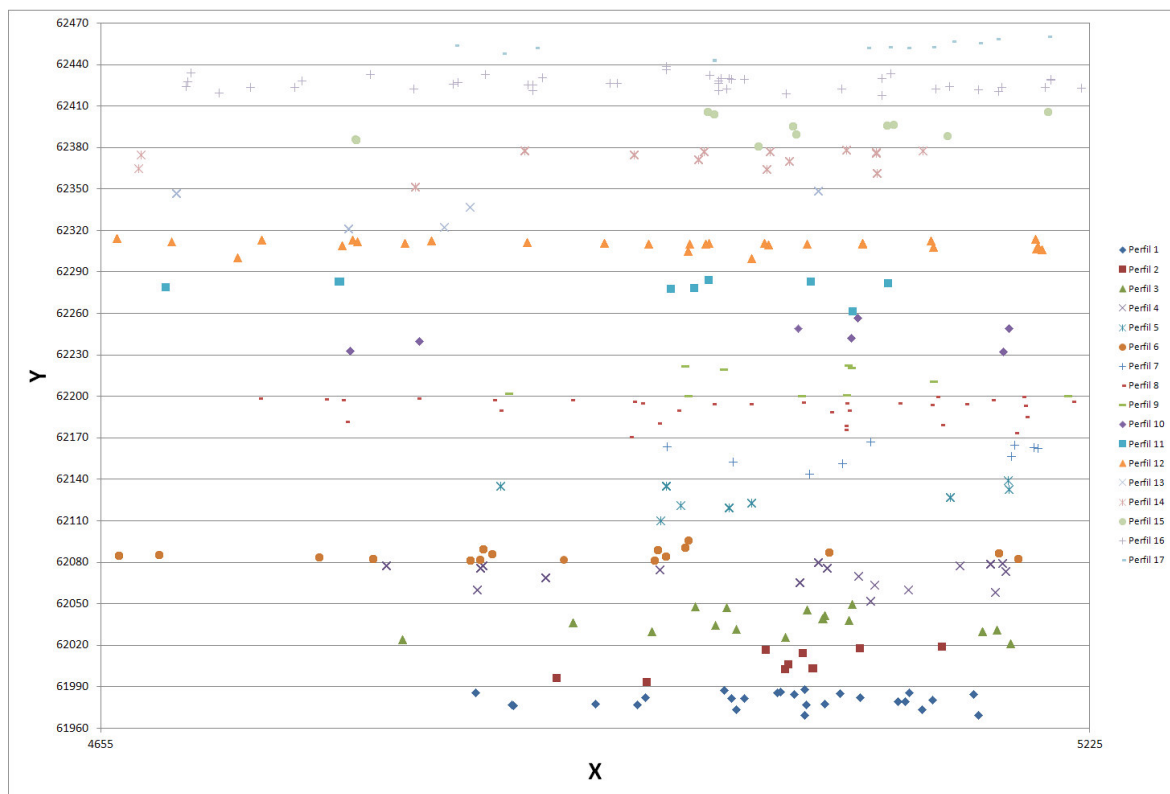


Figura 4.7 Representação das sondagens em planta juntamente com a área de influência dos 17 perfis em que se subdividiu a área de estudo.

Realizou-se primeiramente um cenário simulado dos filões para cada perfil. Nas figuras 4.8 e 4.9 mostram-se os resultados parciais e finais para os perfis 5 e 16, respectivamente, um perfil com poucas sondagens e outro com muitas. Na figura 4.10 mostra-se a evolução da convergência da soma dos desvios para incrementos de 25 intersecções com filões por iteração. Na tabela 4.4 mostram-se os resultados de síntese para os 17 perfis. Face aos desvios iniciais, considerou-se aceitável o máximo de uma unidade que foi conseguido para todas as simulações.

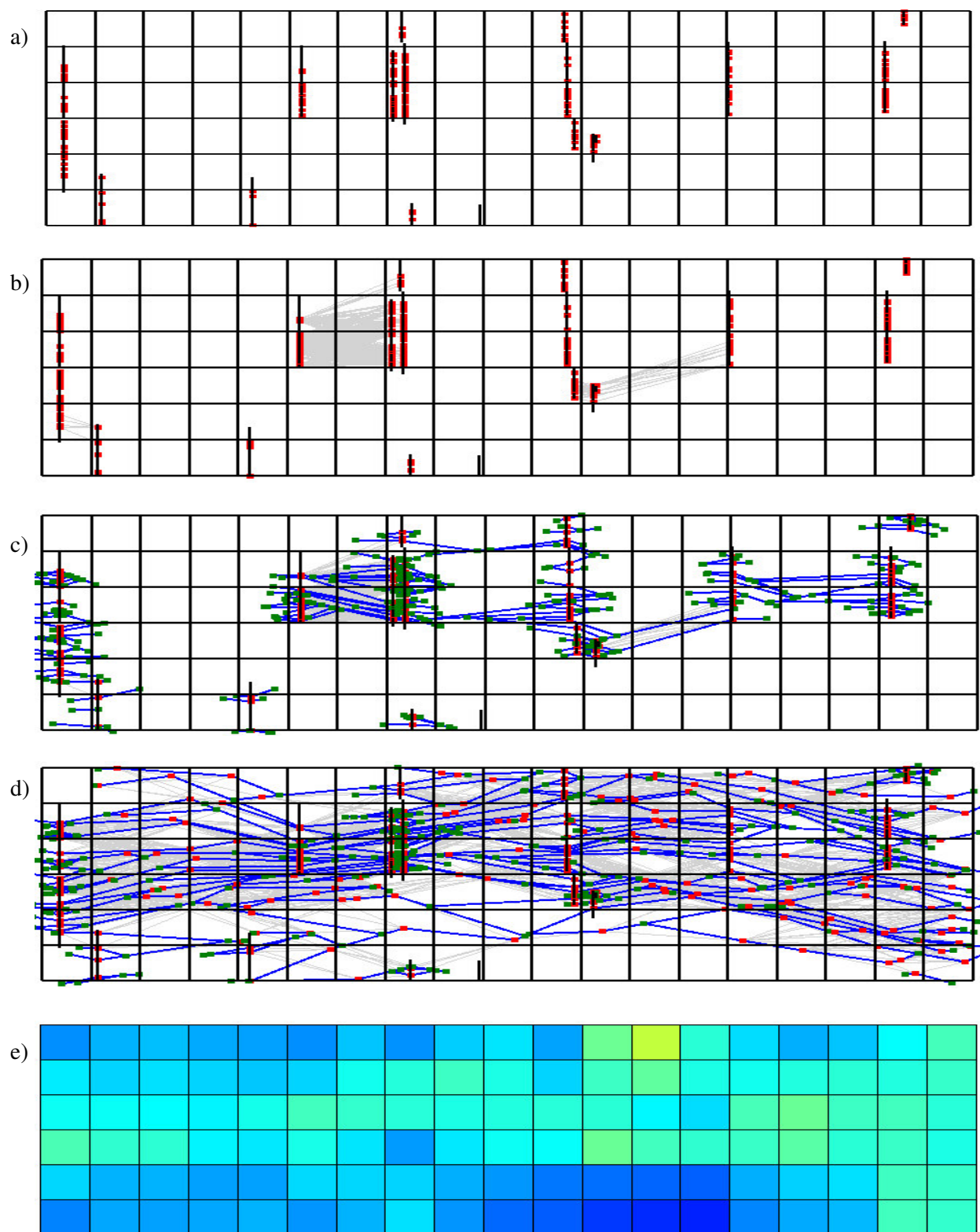


Figura 4.8 Perfil 5: a) sondagens e intersecções com filões a vermelho; b) rede de ligações admissíveis entre intersecções; c) simulação de filões só com a informação das sondagens; d) simulação optimal dos filões após a adição de 150 intersecções virtuais; e) imagem estimada da NFM por krigagem com deriva externa (a escala é a mesma da figura 4.5).

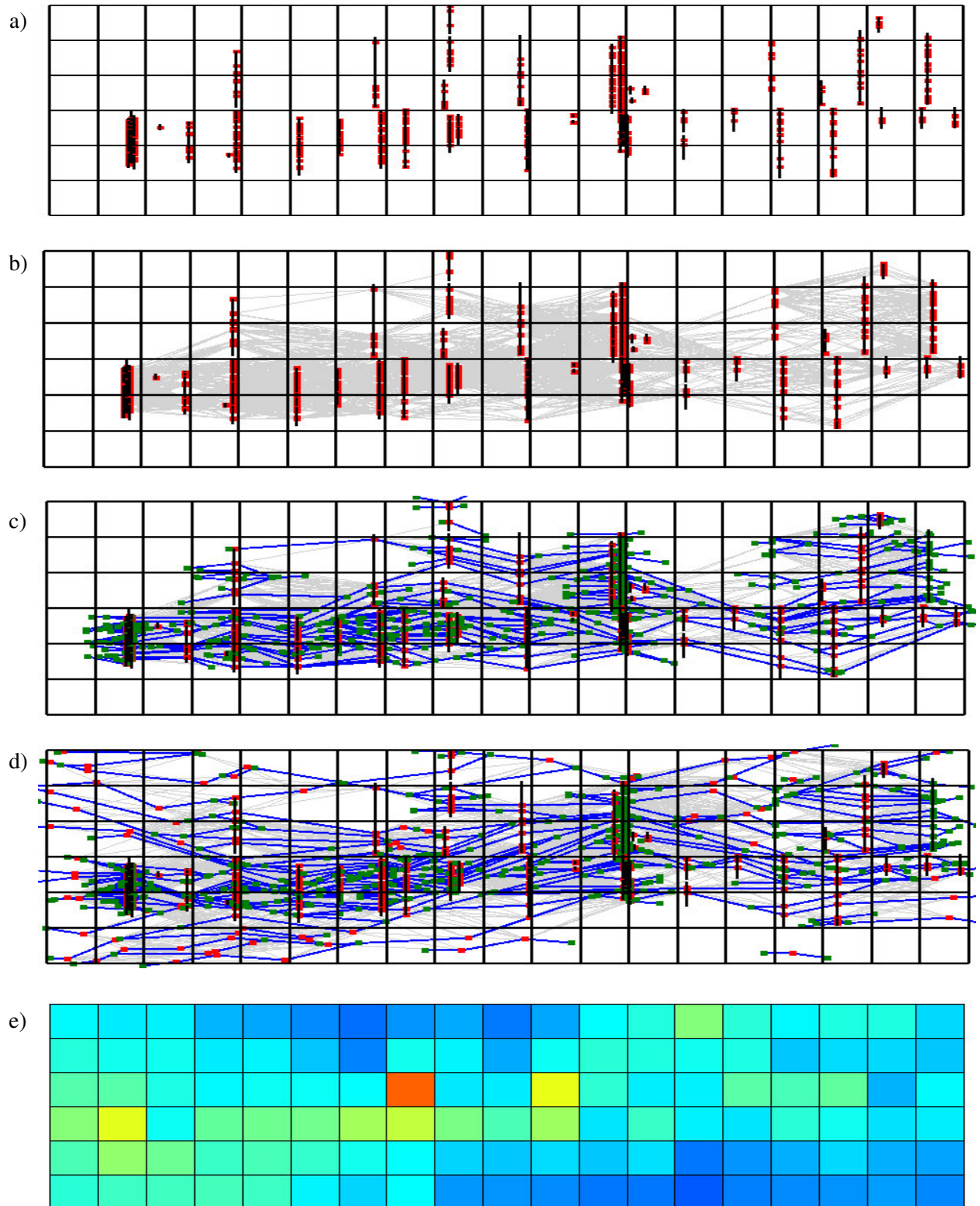


Figura 4.9 Perfil 16: a) sondagens e intersecções com filões a vermelho; b) rede de ligações admissíveis entre intersecções; c) simulação de filões só com a informação das sondagens; d) simulação optimal dos filões após a adição de 50 intersecções virtuais; e) imagem estimada da NFM por krigagem com deriva externa (a escala é a mesma da figura 4.5).

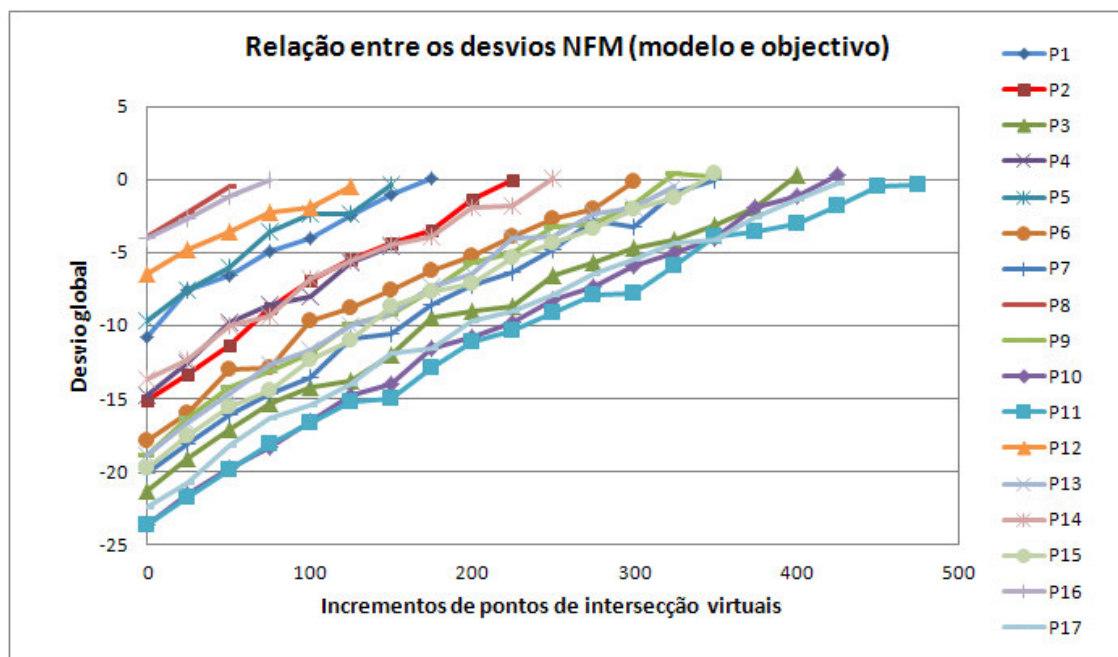


Figura 4.10 Evolução da convergência da soma dos desvios para incrementos de 25 intersecções com filões por iteração para os perfis de 1 a 17.

Tabela 4.4 – Resultados de síntese dos modelos dos filões para os 17 perfis do volume em estudo.

Perfil	Nº de intersecções			Comprimento (m)		Desvio (KED-MODELO)	
	Inicial	Adicionadas	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	154	175	329	3661	11429	-10,791	0,087
2	62	225	287	1854	12705	-15,154	-0,088
3	51	400	451	1576	15652	-21,287	0,257
4	145	275	420	4112	15527	-14,83	0,792
5	187	150	337	5768	12742	-9,742	-0,353
6	61	300	361	1672	13685	-17,864	-0,108
7	43	350	393	1487	14813	-20,106	-0,039
8	389	50	439	11561	13719	-3,899	-0,510
9	82	350	432	2705	15625	-18,868	0,210
10	38	425	463	1283	17183	-23,668	0,332
11	78	475	553	2402	18319	-23,621	-0,365
12	287	125	412	10128	13871	-6,458	-0,436
13	27	325	352	815	13310	-18,903	-0,436
14	115	250	365	3957	13655	-13,660	0,107
15	35	350	385	1022	15031	-19,739	0,361
16	453	75	528	10705	12868	-4,085	-0,085
17	72	425	497	2168	17442	-22,441	-0,208

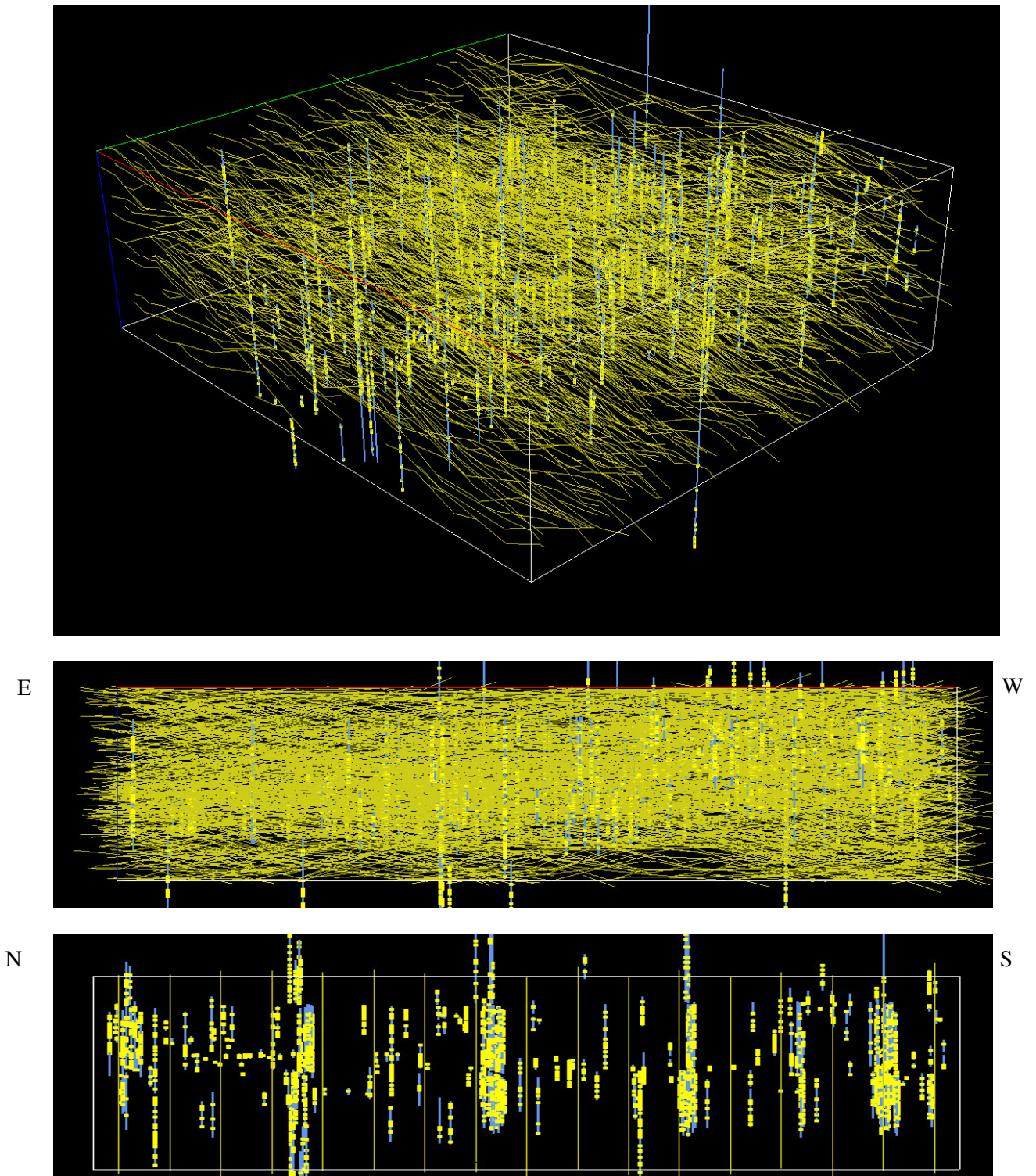


Figura 4.11 Representação do conjunto das simulações 2D dos filões nos 17 perfis e vistas em secções verticais.

Tabela 4.5 – Resultados quantitativos de uma realização de filões agregados por perfil.

Perfil	NFM (KED)	Comprimento total dos filões (m)	Nº de filões gerados	Comprimento médio por filão (m)
1	0,161	11429	134	85,291
2	0,166	12705	110	115,151
3	0,214	15652	161	97,017
4	0,206	15527	169	91,695
5	0,186	12742	164	77,538
6	0,191	13685	135	101,121
7	0,202	14813	142	104,317
8	0,215	13719	216	63,514
9	0,213	15625	166	94,316
10	0,231	17183	169	101,875
11	0,256	18319	195	93,783
12	0,212	13871	193	71,747
13	0,182	13310	122	109,098
14	0,188	13655	148	92,264
15	0,192	15031	134	112,451
16	0,223	12868	256	50,266
17	0,234	17442	178	97,989

4.4 QUANTIFICAÇÃO DE RESULTADOS

Para quantificação e avaliação da incerteza, e a título de exemplificação da metodologia, foram simuladas 20 realizações da geometria dos filões para os perfis 5 (P5) e 16 (P16). Na tabela 4.6 apresentam-se os resultados por simulação, nomeadamente o comprimento dos filões, possança média, volume de filão e relação estéril / filão potencialmente mineralizado (REM). Os valores da possança média comparam com a média observada nas sondagens de 0,078m e os valores da REM comparam com o valor 48,35 também observado das sondagens.

Tabela 4.6 – Resultados das 20 realizações em termos de quantidades de síntese: comprimentos, possanças, volumes e REM.

#	Comprimento filão (m)		Possança média (m)		Volume filão (m3)		REM	
	P5	P16	P5	P16	P5	P16	P5	P16
1	12742	12868	0,063	0,048	60233	45758	50,10	66,27
2	12881	13981	0,063	0,049	60399	53758	49,96	56,26
3	13644	14438	0,067	0,048	68720	51880	43,79	58,33
4	12500	14102	0,064	0,047	61823	51793	48,79	58,43
5	13193	14357	0,062	0,049	62431	53093	48,30	56,97
6	12127	13238	0,067	0,049	62259	46501	48,44	65,19
7	12809	14081	0,065	0,049	62620	51836	48,15	58,38
8	13390	14101	0,067	0,048	68003	50817	44,26	59,57
9	12117	14081	0,058	0,048	55093	48918	54,87	61,92
10	13306	13964	0,063	0,050	61074	49746	49,40	60,87
11	12414	13539	0,063	0,048	58180	47997	51,90	63,13
12	12647	13654	0,058	0,052	56741	51344	53,25	58,95
13	12778	14430	0,066	0,050	62025	54560	48,63	55,42
14	12385	14258	0,063	0,050	62085	55216	48,58	54,74
15	12388	14676	0,061	0,049	58325	55563	51,77	54,40
16	12462	13578	0,060	0,049	57806	52341	52,25	57,81
17	12970	13726	0,064	0,050	61848	52489	48,77	57,64
18	12843	14018	0,062	0,048	60417	51527	49,95	58,74
19	12756	14064	0,062	0,048	55988	48105	53,98	62,98
20	12428	14386	0,066	0,048	59100	51904	51,08	58,30
Média	12739	13977	0,063	0,049	60759	51257	49,81	59,21
Variância	160805	182671	0,000007	0,000001	11286094	7016126	7,494	10,211
Coef. variação	0,0315	0,0306	0,0414	0,0227	0,0553	0,0517	0,0550	0,0540

4.5 DISCUSSÃO

Com os resultados apresentado no exemplo pode-se referir que:

Quanto à estimação por KED da variável NFM:

- 1) A variável NFM tem um papel muito importante na modelação dos corpos geológicos – filões –, porque permite controlar a intensidade local dos objectos gerados de forma estocástica. A NFM é conhecida na localização das sondagens pelo que foi estimada para todo o volume de estudo por KED. A KED permitiu incorporar a não estacionariedade desta variável em profundidade, obtendo-se uma malha estimada com o mesmo comportamento do que é observado nos dados experimentais (baixo, alto e baixo novamente, de cima para baixo, em cota).
- 2) O variograma dos resíduos é de baixa qualidade na direcção horizontal, mas é aceitável assumir-se uma isotropia desta variável relativamente à direcção vertical.
- 3) Os valores estimados de NFM são sistematicamente mais baixos do que os observados nos dados experimentais, o que é normal porque a NFM é uma variável muito assimétrica positiva e a estimação tende a diminuir a variância dos dados. Neste caso, como a lei é assimétrica, a média tende a baixar significativamente. Em futuros trabalhos pode colocar-se a hipótese de simular esta variável com um algoritmo geoestatístico como a simulação sequencial Gaussiana ou a directa, explorando assim também este aspecto de incerteza.

Quanto à simulação de filões potencialmente mineralizados e resultados quantitativos

- 1) A geração estocástica dos filões por aproximações por linhas poligonais a 2D foi realizada ao longo de 17 perfis que cobrem todo o volume de estudo. A informação de partida são os traços de sondagem (filão e não filão) e a intensidade via variável NFM estimada por KED na malha de blocos.
- 2) Para testar o algoritmo, consideraram-se comprimentos máximos de 90 m para fazer ligações entre sondagens e de 30 metros nas terminações. Os ângulos de pendor máximos admissíveis foram de 30°. Não foi feita análise de sensibilidade a estes parâmetros, mas em trabalhos futuros estes devem ser revistos com geólogos conhecedores deste depósito, melhorando-se o realismo.
- 3) Nas figuras 4.8 e 4.9 mostra-se que a intensidade dos filões em profundidade está de acordo com os valores estimados da variável NFM, concentrando-se mais filões em

- cotas intermédias. A convergência é mais rápida quando o número de sondagens é maior, necessitando de se adicionar menos intersecções virtuais.
- 4) A geração da geometria dos filões é relativamente rápida, cerca de 20 segundos para cada iteração com mais intersecções. A re-escrita para linguagem C diminuirá o tempo de execução para provavelmente menos de um segundo.
 - 5) Em todas as simulações foram obtidos valores de desvios menores do que a tolerância máxima admissível de uma unidade, sinal de que a optimização foi conseguida. Menores desvios obrigariam a menores incrementos, o que levaria a mais iterações e maior tempo de cálculo desnecessário para esta fase de demonstração.
 - 6) Os dados da tabela 4.5 permitem estimar o comprimento médio dos filões simulados em 88,6m. Se admitirmos que esta dimensão é isotrópica, isso representa cerca de três blocos de 30 metros cada. Se se calcular o número médio de filões gerados em conjuntos de três perfis, e se forem somados estes valores para o conjunto dos perfis, os valores rondam o milhar de filões, ou seja, a simulação envolveu em média a geração de um total de pouco mais de 1000 filões. Este número está na ordem de grandeza do que é referido como número de filões inventariados nas Minas da Panasqueira, da ordem do milhar (Póvoa, 2011).
 - 7) As possanças médias das simulações (tabela 4.6) é mais baixa do que a média dos dados experimentais, e esta diferença é ainda maior para o perfil 16 à partida com mais sondagens (onde era de esperar maior proximidade). A questão pensa-se estar relacionada com o número de filões que é maior no perfil 16 do que no perfil 5 (164 para 256), e com as terminações dos filões. Ao acrescentar terminações entre 0 e 30 metros com lei uniforme, gera-se um comprimento médio de 15 metros e nesse comprimento a possança é reduzida gradualmente até zero na extremidade. Na prática, a diminuição é muito mais rápida (os chamados “rabos de enguia”) pelo que esta questão deverá ser retomada acrescentando mais do que um segmento de terminação e fazendo que só no último a possança seja reduzida para zero. Na mesma tabela a REM do perfil 16 acentua o desvio com os dados experimentais muito provavelmente pelo mesmo motivo, já no perfil 5 os valores são praticamente iguais.
 - 8) Na avaliação da incerteza, os coeficientes de variação das medidas de quantidade calculadas por simulação são menores no perfil 16 relativamente ao perfil 5 o que está de acordo com a geração de mais intersecções virtuais no perfil 5. Mesmo assim a diferença é pequena, e a incerteza deverá ser explorada no futuro também a geração de cenários para a variável NFM.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo, que pudesse ser considerado uma alternativa viável para a modelação de mineralizações filonianas, a partir do caso de estudo da Mina da Panasqueira.

Para o efeito foi desenvolvida uma metodologia estocástica de geração de filões por objectos que respeita a não estacionariedade da ocorrência dos filões em profundidade. Procedeu-se, em primeiro lugar, à estimação por krigagem com deriva externa da intensidade local de filões, expressa em número de intersecções por metro linear (NFM). Posteriormente, desenvolveu-se e testou-se um algoritmo de simulação da geometria dos filões condicionada aos valores de NFM.

Esta abordagem proposta propõe-se gerar um modelo geológico mais realista do que os resultados de metodologias clássicas, já que incorpora informações de atitudes e extensão de filões, não totalmente previsíveis, sob a forma de leis estatísticas. O resultado do modelo dos filões mineralizados são linhas poligonais abertas, que associadas à espessura local, estão aptas a serem convertidas em volumes e fracções de quantidades, nomeadamente, a REM. A abordagem proposta tem ainda a vantagem de explorar o espaço de incerteza proporcionado pelas sondagens, o que não é de todo abordado com as metodologias clássicas, nomeadamente as de desenho geológico.

Esta abordagem está apta a poder ser utilizada quer em fase de prospecção quer em fase de mineração. Poderá ser utilizada para otimizar o desenho da amostragem por sondagens, com a consequente redução dos custos. Para melhor validação e calibração do modelo, será interessante confrontar os resultados obtidos no presente trabalho com os obtidos por métodos clássicos na Mina da Panasqueira, assim como os dados de produção em áreas já exploradas.

Este protótipo é apresentado em primeira versão, pelo que existem grandes possibilidades de evolução e melhoria, um dos passos será a evolução para linguagem C, que crê-se trará maior rapidez. Deverá ainda ser preparado para funcionar a 3D, passando a geração dos filões de segmentos de recta para um mosaico de triângulos. Outra questão não menos importante e até mais complexa será a inserção dos teores de minérios nos filões.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J.A. (1992) Modelos geométricos para caracterização de recursos minerais. Tese de Mestrado IST – Universidade Técnica de Lisboa.
- Almeida, J., Soares, A., Reynaud, R. (1993) Modelling the Shape of Several Marble Types in a Quarry, in: Elbrond, J., Tang, X. (Eds.), Proceedings of the XXIV APCOM (International Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries), Montreal, vol. 3, 452-459.
- Almeida, J., Soares, A., Albuquerque, A. (1997) Zonal control to estimate classes of histograms: application to a diamond alluvial deposit, in Baafi, E.Y., Schofield, N.A. (Eds.), Geostatistics Wollongong'96, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 2: 658-69.
- Almeida, J.A. (2010a) Modelling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. *Engineering Geology* 114 (1-2), 26-33.
- Almeida, J.A. (2010b) Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs, *Earth Science Reviews* 101, 250-270.
- Almeida, J.A., Vintém, C., Luís, A.G., Lopes, M. (2003) Modelação estocástica da compartimentação dos mármore na unidade de Borba, *A Geologia de Engenharia e Recursos Geológicos* (II), 309-321.
- Alves, F., Almeida, J.A., Silva, A.P. (2014) Simulation of acoustic impedance images by stochastic inversion of post-stack seismic reflection amplitudes and well data. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 121, 52-65.
- Batista, A.C., Sousa, A.J., Batista, M.J., Viegas, L. (2001) Factorial kriging with external drift: a case study on the Penedono region, Portugal. *Applied Geochemistry* 16: 921-929.
- Barbosa, S. (2013) Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo. Tese de doutoramento, FCT – Universidade Nova de Lisboa.
- Caupers, D., Guerreiro, L., Rodrigues, J.P., Almeida, J.A., Soares, A. (1995) Geometric Modelling for the Mining Dilution Control. Proceedings of CAMI'95, Computer Applications in the Mineral Industry, H.S. Mitri (Eds.).McGill University, Canada.
- Charifo, G. (2008) Caracterização e Avaliação de Reservas Geológicas do Depósito Mineral de Farim-Saliquinhé. Tese de Mestrado, FCT – Universidade Nova de Lisboa. 82 p.
- Charifo, G., Almeida, J.A. (2010) Caracterização e Avaliação de Reservas Geológicas do Depósito Mineral de Farim-Saliquinhé. *REM: Revista Escola de Minas* 63 (3), 569-580.

Charifo, G., Almeida, J.A., Ferreira, A. (2013) Managing borehole samples of unequal lengths to construct a high-resolution mining model of mineral grades zoned by geological units. *Journal of Geochemical Exploration* 132, 209-223.

Charifo, G., Ferreira, A.M., Almeida, J.A., Prian, J.P. (2014) Geochemical and statistical characterization of the phosphate facies of the Farim-Saliquinhé phosphate mineralization (Guinea-Bissau). *Resource Geology* 64 (1), 58-75.

Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, NY, 480 p.

Jaques-Ribeiro, L.M., Gonçalves, A.C.R. (2013) Contributo para o conhecimento geológico e geomorfológico da área envolvente do couro mineiro da Panasqueira. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, n.º 3 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território: 93-116.

Journel, A., Huijbregts, Ch.J. (1978) *Mining Geostatistics* (1st ed.), Academic Press, London, 600 p.

Kelly, W.C., Rye, R.O. (1979) Geologic, fluid inclusion and stable isotope studies of the tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. *Economic Geology*, 74, 1721-1822.

Lassner, J., Schubert, W. (1999) *Tungsten - Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, Viena, Austria, 434 p.

Lourenço, A. (2002) *Paleofluidos e mineralizações associadas às fases tardias da orogenia hercínica*. Tese de doutoramento, FC – Universidade do Porto. 326 p.

Luís, A.G., Sousa, A.J. (1998) Simulação geoestatística de redes de fracturas. Aplicação à avaliação da blocometria de um jazigo de mármore, *Comunicações Instituto Geológico Mineiro*, 85: 117-136.

Matias, F.V., Almeida, J.A., Chichorro, M. (2010a) 3D modelling of a subsector of Casas Novas gold mineralization, Montemor-o-Novo, Portugal, *Proceedings of the 30th gOcad meeting*.

Matias, F.V., Chichorro, M.A., Almeida, J.A. (2010b) Modelação geológica 3D de um subsector das mineralizações auríferas de Casas Novas (Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo). *Relações espaciais e temporais entre as rochas Carboníferas graníticas, andesíticas e dacíticas e as mineralizações de ouro*. VIII Congresso Nacional de Geologia, (22) 10, Braga.

- Marignac, C. (1973) Analyse structurale de l'environnement du gisement à tungsten-étain de Panasqueira (Beira Baixa, Portugal); implications génétiques. C. R. Acad. Sci. Ser. D., Paris, 277: 269-272.
- Misra, K. (2000) Understanding mineral deposits. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands 845p.
- Moon, C., Whateley, M., Evans, A. (2006) Introduction to Mineral Exploration. Blackwell Publishing, Victoria, Austrália, 481p.
- Nunes, R., Almeida, J.A. (2010) Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. Computers & Geosciences 36, 1042–1052.
- Oosterom, M., Bussink, R., Vriend, S. (1984) Lithogeochemical Studies of Aureoles Around the Panasqueira Tin-Tungsten Deposit, Portugal, Mineralium Deposita 19, 283-288.
- Pitfield, P., Brown, T. (2011) Tungsten Profile. British Geological Survey, Nottingham U.K., 34 p.
- Póvoa, P. (2011) Magnetotelúrica aplicada à prospecção mineira. Tese de Mestrado, FC – Universidade de Lisboa, 123p.
- Quental, P., Almeida, J.A., Simões, M. (2012) Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. Advances in Water Resources 39, 18–32.
- Reis, A. (1971) As Minas da Panasqueira. Boletim de Minas, Lisboa: Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, 8 (1) Jan-Mar. 3-44.
- Reuelta, M.B., Jimeno, C.L. (1997) Manual de evaluacion y.diseño de explotaciones mineras. Entorno Grafico, S.L., 705p.
- Ribeiro, A., Pereira, E. (1981) Controlos paleogeográficos, petrológicos e estruturais na génese dos jazigos portugueses de estanho e volfrâmio. Geonovas, 1 (3): 23-31.
- Robb, L. (2005) Introduction to Ore-Forming Processes. Blackwell Publishing, Victoria, Austrália 373p.
- Rodrigues, A. (2013) Modelação 3D de teores de depósitos minerais condicionados por tipos de mineralização. O caso de estudo do depósito do Zambujal, Minas de Neves-Corvo. Tese de Mestrado, FCT – Universidade Nova Lisboa, 70p.

Schmidt, S. (2012). From Deposit to Concentrate: The Basics of Tungsten Mining Part 1: Project Generation and Project Development. International Tungsten Industry Association, Austria, June 2012, 20 p.

Silveira, C. (2008) O interesse do tungsténio (W) e estanho (Sn) da Mina da Panasqueira - Contributo para o ensino das Ciências da Natureza. Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 158 p.

Soares, A. (2000) Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente (Geostatistics for Earth and Environmental Sciences), Instituto Superior Técnico Press, Lisboa, 206 p.

Srivastava, R.M. (2005) Probabilistic Modeling of Ore Lens Geometry: An alternative to Deterministic Wireframes. *Mathematical Geology*, 37 (5).

Thadeu, D. (1951) Geologia do couro mineiro da Panasqueira, *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 32, 5-64.